

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-105826

(43)公開日 平成6年(1994)4月19日

(51)Int.Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
A 6 1 B 5/107				
G 0 1 B 11/24		Z 9108-2F		
G 0 6 F 15/62	3 9 0	Z 9287-5L		
	4 1 5	9287-5L		
		8932-4C		
			A 6 1 B 5/ 10	3 0 0 Q
			審査請求 未請求	請求項の数11(全 33 頁)

(21)出願番号 特願平4-277838

(22)出願日 平成4年(1992)9月22日

(71)出願人 000001959

株式会社資生堂

東京都中央区銀座7丁目5番5号

(71)出願人 592201047

小沢 慎治

神奈川県鎌倉市岡本1-19-3-305

(72)発明者 諸沢 敬二

神奈川県横浜市港北区新羽町1050 資生堂
研究所内

(72)発明者 高橋 元次

神奈川県横浜市港北区新羽町1050 資生堂
研究所内

(74)代理人 弁理士 大菅 義之

最終頁に続く

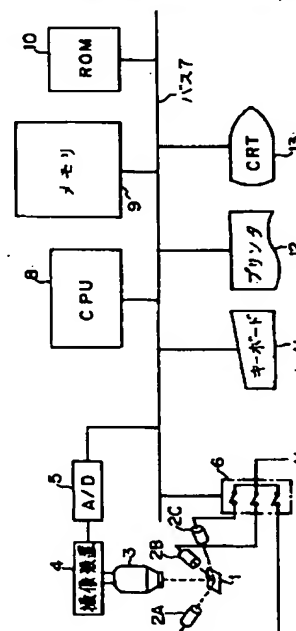
(54)【発明の名称】 皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置

(57)【要約】

【目的】 皮膚表面の微細な形状を抽出して、皮膚の性状、肌質、それらの加齢による変化を判定するための指標となる特徴情報を抽出する装置に関し、皮膚表面の3次元の形状を復元することを可能にし、それによってより正確な皮膚表面形状の特徴を抽出可能とすることを目的とする。

【構成】 CPU 8は、バス7を介してスイッチ6を制御することによって、レプリカ面1を第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cによって順次照明させ、各照明動作に対応して拡大光学系3、撮像装置4、及びA/D変換器5から得られる3枚の画像データを、バス7を介してメモリ9に順次取り込む。CPU 8は、これら3枚の画像データの各画素の明度値から、レプリカ面画像の各画素位置におけるレプリカ面1のグラディエントを計算し、そのグラディエントに基づいて、皮膚表面の3次元形状に関する種々の特徴パラメータを抽出する。

本発明による皮膚表面形状の特徴抽出装置の構成図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 皮膚表面形状を照明する照明手段と、前記皮膚表面形状を撮像し、該皮膚表面形状の各平面位置に対応する各画素位置の明度値を表すデジタル画像データを出力する撮像手段と、前記照明手段による複数の光源方向からの照明に対応して前記撮像手段からそれぞれ得られる複数枚の前記デジタル画像データを記憶する画像データ記憶手段と、前記複数の光源方向の情報と前記複数枚のデジタル画像データから得られる明度値に基づいて、前記各画素位置における前記皮膚表面形状の勾配を抽出する勾配抽出手段と、前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配に基づいて、前記皮膚表面形状に関する特徴情報を抽出する特徴情報抽出手段と、を有することを特徴とする皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項2】 皮膚表面形状を照明する照明手段と、前記皮膚表面形状を撮像し、該皮膚表面形状の各平面位置に対応する各画素位置の明度値を表すデジタル画像データを出力する撮像手段と、前記照明手段による複数の光源方向からの照明に対応して前記撮像手段からそれぞれ得られる複数枚の前記デジタル画像データを記憶する画像データ記憶手段と、前記複数の光源方向の情報と前記複数枚のデジタル画像データから得られる明度値に基づいて、前記各画素位置における前記皮膚表面形状の勾配を抽出する勾配抽出手段と、前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配に基づいて、前記皮膚表面形状の1つである皮溝の形状に関する特徴情報と、前記皮膚表面形状の1つである前記皮溝の交点領域の形状に関する特徴情報のうち、少なくとも1つ以上を抽出する特徴情報抽出手段と、を有することを特徴とする皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項3】 皮膚表面形状を照明する照明手段と、前記皮膚表面形状を撮像し、該皮膚表面形状の各平面位置に対応する各画素位置の明度値を表すデジタル画像データを出力する撮像手段と、前記照明手段による複数の光源方向からの照明に対応して前記撮像手段からそれぞれ得られる複数枚の前記デジタル画像データを記憶する画像データ記憶手段と、前記複数の光源方向の情報と前記複数枚のデジタル画像データから得られる明度値に基づいて、前記各画素位置における前記皮膚表面形状の勾配を抽出する勾配抽出手段と、

前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配に基づいて、前記皮膚表面形状の1つである皮溝の形状の領域に関する特徴情報と、前記皮溝の形状の面積に関する特徴情報と、前記皮溝の形状の方向に関する特徴情報と、前記皮溝の形状の深さに関する特徴情報と、前記皮溝の形状の幅に関する特徴情報と、前記皮溝の形状の長さに関する特徴情報と、前記皮溝の形状の数に関する特徴情報と、前記皮膚表面形状の1つである前記皮溝の交点領域の形状の領域に関する特徴情報と、前記皮溝の交点領域の形状における毛孔の存在する割合に関する特徴情報と、前記皮溝の交点領域の形状における毛孔の深さに関する特徴情報と、前記皮溝の交点領域の形状における毛孔の大きさに関する特徴情報のうち、少なくとも1つ以上を抽出する特徴情報抽出手段と、を有することを特徴とする皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項4】 前記特徴情報抽出手段は、前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配、該勾配の強度、該勾配の方向、又は該勾配の変化の程度の少なくとも1つ以上の情報に基づいて、前記特徴情報を抽出する、ことを特徴とする請求項1乃至3の何れか1項に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項5】 前記特徴情報抽出手段は、前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配の強度を計算し、該勾配の強度に基づいて、前記皮溝の形状の領域及び前記皮溝の形状の面積に関する特徴情報を抽出する、ことを特徴とする請求項3に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項6】 前記特徴情報抽出手段は、前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配の方向を計算し、該勾配の方向に基づいて、前記皮溝の形状の方向に関する特徴情報を抽出する、

ことを特徴とする請求項3に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項7】 前記特徴情報抽出手段は、前記勾配抽出手段により抽出された前記各画素位置毎における前記皮膚表面形状の勾配を前記特徴情報として抽出される前記皮溝の形状の領域内で積分し、該積分の結果に基づいて、前記皮溝の形状の深さ及び前記皮溝の形状の幅に関する特徴情報を抽出する、

ことを特徴とする請求項3に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴

抽出装置。

【請求項8】 前記皮溝の形状の領域に関する特徴情報、前記皮溝の形状の方向に関する特徴情報又は前記皮溝の形状の深さに関する特徴情報に基づいて、前記皮溝の形状の長さに関する特徴情報及び前記皮溝の形状の数に関する特徴情報を抽出する、
ことを特徴とする請求項3に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項9】 前記照明手段によって照明され、前記撮像手段によって撮像される前記皮膚表面形状は、皮膚表面を型取り材料によって型取りした皮膚表面レプリカの表面の形状である、
ことを特徴とする請求項1乃至8の何れか1項に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項10】 前記照明手段によって照明され、前記撮像手段によって撮像される前記皮膚表面形状は、皮膚表面の直接形状である、
ことを特徴とする請求項1乃至8の何れか1項に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【請求項11】 前記勾配抽出手段は、
前記各画素位置毎に、前記複数の光源方向の情報と前記複数枚のデジタル画像データから得られる現在の前記画素位置に対応する複数の明度値に基づいて前記皮膚表面形状の勾配を推定し、
その後、隣接する前記画素位置間で前記推定された勾配が最も滑らかになるという条件と、前記皮膚表面形状を実際に撮像して得られる前記複数の光源方向に対応する複数の明度値と前記推定された勾配に基づいて計算される前記複数の光源方向に対応する複数の反射強度との前記各画素位置毎の誤差が最小となるという条件の下で、前記各画素位置毎に前記推定された勾配を修正し、その結果得られる前記勾配を出力する、
ことを特徴とする請求項1乃至10の何れか1項に記載の皮膚表面に関する画像からの3次元形状の復元に基づく皮膚表面形状の特徴抽出装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、皮膚表面の微細な形状を抽出して、皮膚の性状、肌質、それらの加齢による変化を判定するための指標となる特徴情報を抽出する装置に関する。

【0002】

【従来の技術】皮膚表面には、皮溝と呼ばれる多数の細かい溝、皮溝によって区画分けされる皮丘と呼ばれる小丘、皮溝の交差部分に存在する毛孔などが存在し、それらは皮膚の代謝等の生理的な影響を受けて変化する。

【0003】従って、皮膚表面形状からの特徴抽出は、

皮膚の性状、肌質、それらの加齢による変化を判定するための指標となり、その指標は、皮膚の治療、診断、美容衛生などの分野において有用な情報を提供する。

【0004】皮膚表面形状の特徴抽出の第1の従来例として、皮膚表面をシリコンラバーなどによって型取りして皮膚表面レプリカ（ネガティブレプリカ）を作成し、それを人間が光学顕微鏡で観察する方法がある。

【0005】皮膚表面形状の特徴抽出の第2の従来例として、皮膚表面レプリカを表面粗さ計を用いて触針により走査し、その結果得られた起伏値信号から起伏のピークの高さや数、ピーク面積などを求めて、皮膚表面レプリカ面の凹凸の程度を判定する方法がある。

【0006】皮膚表面形状の特徴抽出の第3の従来例として次のような方法がある。即ち、まず、皮膚表面又は皮膚表面レプリカ面を複数方向例えば3方向から照明する。次に、各照明毎に面を光学顕微鏡を介してテレビカメラで撮像し、その撮像信号をデジタル画像データに変換することによって、各照明画像についてその画像を構成する各画素毎の明度値を求める。そして、そのようにして得られた明度データに対して、デジタル画像処理を施すことにより、幾何学的な特徴パラメータを抽出し、それを皮膚表面形状の特徴情報とする。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかし、前述した第1の従来例では、皮膚表面形状の特徴の評価が目視の所見による主観的な評価であるため、評価が定量性に欠け、評価に熟練を要するという問題点を有している。

【0008】また、前述した第2の従来例では、観察することのできる領域が局所にかたよってしまい面の全体の特徴を抽出するには必ずしも十分でなく、更に、特別な計測装置も必要になってしまうという問題点を有している。

【0009】更に、前述した第3の従来例では、面の全体的な特徴を定量的な特徴パラメータとして抽出することができるが、その特徴パラメータは明度値の分布のみに基づいて抽出されるため、例えば皮溝の深さに関する情報は明度分布から間接的に推定するしかない。

【0010】従って、皮溝の幅や方向性と皮溝の深さとの関係、又は皮溝の交点が本当に毛孔に対応しているか否かなどの判定結果を詳細に求めることは難しく、皮膚表面形状の特徴を必ずしも正確に抽出できないという問題点を有している。

【0011】本発明は、皮膚表面の3次元の形状を復元することを可能にし、それによってより正確な皮膚表面形状の特徴を抽出可能とすることを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】本発明は、まず、皮膚表面又は皮膚表面レプリカなどの皮膚表面形状を照明する照明手段を有する。

【0013】次に、皮膚表面又は皮膚表面レプリカなど

の皮膚表面形状を撮像し、その皮膚表面形状の各平面位置に対応する各画素位置の明度値を表すデジタル画像データを出力する拡大光学系、CCDカメラ、及びA/D変換器などから構成される撮像手段を有する。

【0014】次に、照明手段による複数の光源方向からの照明に対応して撮像手段からそれぞれ得られる複数枚のデジタル画像データを記憶するRAM又はディスク記憶装置などの画像データ記憶手段を有する。

【0015】更に、複数の光源方向の情報と複数枚のデジタル画像データから得られる明度値に基づいて、各画素位置における皮膚表面形状の勾配（グラディエント）を抽出する、例えば所定の制御プログラムにより動作するマイクロプロセッサなどで構成される勾配抽出手段を有する。この勾配抽出手段は、例えば、各画素位置毎に、複数の光源方向の情報と複数枚のデジタル画像データから得られる現在の画素位置に対応する複数個の明度値に基づき皮膚表面形状の勾配を推定し、その後、隣接する画素位置間で推定された勾配が最も滑らかになるという条件と、皮膚表面形状を実際に撮像して得られる複数の光源方向に対応する複数の明度値と推定された勾配に基づいて計算される複数の光源方向に対応する複数の反射強度との各画素位置毎の誤差が最小となるという条件の下で、各画素位置毎に推定された勾配を修正し、その結果得られる勾配を出力する。

【0016】そして、勾配抽出手段により抽出された各画素位置毎における皮膚表面形状の勾配に基づいて、皮膚表面形状に関する特徴情報を抽出する上記マイクロプロセッサなどで構成される特徴情報抽出手段を有する。

【0017】特徴情報抽出手段は、より具体的には、勾配抽出手段により抽出された各画素位置毎における皮膚表面形状の勾配に基づいて、皮膚表面形状の1つである皮溝の形状に関する特徴情報と、皮膚表面形状の1つである皮溝の交点領域の形状に関する特徴情報のうち、少なくとも1つ以上を抽出する。

【0018】皮溝の形状に関する特徴情報とは、皮溝の形状の領域に関する特徴情報、皮溝の形状の面積に関する特徴情報、皮溝の形状の方向に関する特徴情報、皮溝の形状の深さに関する特徴情報、皮溝の形状の幅に関する特徴情報、皮溝の形状の長さに関する特徴情報、又は皮溝の形状の数に関する特徴情報などである。

【0019】皮溝の交点領域の形状に関する特徴情報とは、皮溝の交点領域の形状の領域に関する特徴情報、皮溝の交点領域の形状における毛孔の存在する割合に関する特徴情報、皮溝の交点領域の形状における毛孔の深さに関する特徴情報、皮溝の交点領域の形状における毛孔の大きさに関する特徴情報などである。

【0020】そして、特徴情報抽出手段は、勾配抽出手段により抽出された各画素位置毎における皮膚表面形状の勾配、その勾配の強度、その勾配の方向、又はその勾配の変化の程度の少なくとも1つ以上の情報に基づい

て、特徴情報を抽出する。

【0021】

【作用】皮膚表面形状の3次元形状を各画素位置での勾配を介して抽出できるため、皮溝の形状の領域、面積、方向、深さ、幅、長さ、又は数に関する特徴情報、或いは、皮溝の交点領域の形状の領域、そこでの毛孔の存在する割合、毛孔の深さ、又は大きさに関する特徴情報などを詳細に評価することができる。

【0022】

【実施例】以下、図面を参照しながら本発明の実施例につき詳細に説明する。

<皮膚表面形状の特徴抽出装置の構成>図1は、本発明による皮膚表面形状の特徴抽出装置の構成図である。

【0023】まず、レプリカ面1は、皮膚表面をシリコンラバーなどによって型取りして皮膚表面レプリカ（ネガティブレプリカ）の表面部分である。第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cは、レプリカ面1を選択的に照明し、仰角は例えば30度、照明方位は例えば相互に120度ずつずらされている。

【0024】スイッチ6は、バス7を介してCPU8によって制御され、第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cを順次選択的に点灯させる。拡大光学系3は、低倍率顕微鏡又は接写レンズによって構成され、所定の倍率のレプリカ面画像が得られるように構成される。

【0025】撮像装置4は、例えばCCD撮像素子であり、拡大光学系3を介して得られたレプリカ面画像を走査し、各画素位置の明度に従って振幅が変化するアナログ電気信号を発生する。

【0026】A/D変換器5は、撮像装置4から発生されたアナログ電気信号をデジタル画像データに変換する。メモリ9は、主記憶装置である半導体メモリを含み、画像データの記憶量に応じて補助記憶装置であるハードディスク装置又は光磁気ディスク装置などを含むように構成することもできる。

【0027】CPU8は、ROM9に記憶された制御プログラムに従って装置全体を制御する例えばマイクロプロセッサであり、まず、バス7を介してスイッチ6を制御することによって、レプリカ面1を第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cによって順次照明させ、各照明動作に対応してA/D変換器5から得られる3枚のデジタル画像データを、バス7を介してメモリ9に順次取り込む。

【0028】次に、CPU8は、メモリ9に取り込んだ3枚のデジタル画像データの各画素の明度値から、レプリカ面画像の各画素位置におけるレプリカ面1のグラディエント（勾配）を計算し、その計算結果をメモリ9に格納する。

【0029】続いて、CPU8は、メモリ9に得られた上述のグラディエントに基づいて、皮膚表面の3次元形

状に関する種々の特徴パラメータを抽出し、その特徴パラメータをメモリ9に記憶すると共に、プリンタ12又はCRTディスプレイ12などに出力する。

【0030】また、ユーザは、キーボード10からCPU8に対して各種指示を行うことができる。

<3次元形状復元の原理>本発明では、レプリカ面1の各位置でのグラディエント（勾配）を得ることにより、レプリカ面1の各位置における深さ情報を得ること、即ち、レプリカ面1の3次元形状を復元することを可能としている。

【0031】そこで、上述の構成を有する皮膚表面形状の特徴抽出装置の具体的な動作について説明する前に、3次元形状復元の原理について説明する。

撮像方向の決定

今、レプリカ面1に関して、図2に示されるように3次元のxyz座標を定義し、レプリカ面1上の任意の微小領域において、当該微小領域に垂直な方向を有する単位ベクトルを表面法線ベクトル \underline{n} （下線は、それが付された記号がベクトル量であることを示す。以下同じ。）、当該微小領域から1つの光源に向かう方向を有する単位ベクトルを光源方向ベクトル $\underline{n_s}$ 、当該微小領域からそれを撮像するカメラの焦点に向かう方向を有する単位ベクトルを撮像方向ベクトル $\underline{n_o}$ とする。また光源方向ベクトル $\underline{n_s}$ と表面法線ベクトル \underline{n} のなす角を入射角 i 、撮像方向ベクトル $\underline{n_o}$ と表面法線ベクトル \underline{n} のなす角を反射角 e 、撮像方向ベクトル $\underline{n_o}$ と光源方向ベクトル $\underline{n_s}$ のなす角を位相角 g とする。

【0032】なお、本実施例ではレプリカ面1はネガティブレプリカ面であるため、例えば皮溝は図面の上方向に盛り上がる形状として表され、皮溝の深さ方向は-z方向となる。

【0033】今、レプリカ面1が理想的な乱反射面（ランバート面と呼ばれる）であると仮定する。皮膚表面レプリカは、皮膚表面をシリコンラバーによって型取りしたものであるため、レプリカ面1はランバート面としての特性を十分に備えていると仮定できる。

【0034】この場合、レプリカ面1上の任意の微小領域における光の反射強度は、光源からの入射光（一様光）の入射角 i の余弦 $\cos i$ にのみ比例する。即ち、ランバート面と仮定できるレプリカ面1上の任意の微小領域は、当該微小領域がどの反射角 e で撮像されても同じ明るさに撮像される。これは、レプリカ面1で単位面積あたりに反射される光量は、反射角 e の余弦値に比例して減少するが、ある任意の立体角内で撮像される当該微小領域の表面積は反射角 e の余弦値に反比例して増加するため、結果的に、撮像される当該微小領域の明るさは撮像方向を示す反射角 e によらず一定となるからである。

【0035】従って、ランバート面と仮定できるレプリカ面1の各点を撮像する場合には、各点に対する反射角

e は考慮する必要はなく、図1の拡大光学系3の光軸は、例えばレプリカ面1が置かれている面に対しほぼ直交する方向に定めればよい。

グラディエントと表面法線ベクトルとの関係

レプリカ面1の3次元形状を復元するためには、レプリカ面1を撮像して得たレプリカ面画像の各画素位置でのレプリカ面1のグラディエント（勾配）を求めることができればよい。各画素位置におけるグラディエントを求めることができれば、それらを一定の方向に積分することによって、レプリカ面1の3次元形状を復元できるからである。

【0036】今、図2で定義されるxyz座標中のレプリカ面1を次式で表す。

【0037】

【数1】

$$z = f(x, y)$$

【0038】この数式で表わされるレプリカ面1のグラディエントは、各要素が次式で示されるベクトル (p, q) によって表すことができる。

【0039】

【数2】

$$p = \frac{\partial(z)}{\partial x}$$

$$q = \frac{\partial(z)}{\partial y}$$

【0040】ここで、図2に示されるxyz座標中のレプリカ面1上の任意の微小領域は、次式で示される平面で近似することができる。

【0041】

【数3】

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

$$\therefore z = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C}$$

【0042】数式2と数式3から、当該微小領域におけるグラディエントの要素 p, q は、次式で表すことができる。

【0043】

【数4】

$$p = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C} \right) = -\frac{A}{C}$$

$$q = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C} \right) = -\frac{B}{C}$$

【0044】従って、数式3と数式4より、当該微小領

域の平面は次式で表わされる。

【0045】

【数5】

$$z = p x + q y + K$$

(K:定数)

【0046】今、所定の点(0,0,K)は、数式5の方程式を満足するため、この点は当該微小領域の平面上の点である。そして、この点から当該微小領域の平面上の任意の点(x,y,z)へのベクトル(x,y,z-k)は、当該微小領域の表面法線ベクトル \underline{n} と直交するため、これらのベクトルの内積は0である。

【0047】ここで、図2では、表面法線ベクトル \underline{n} は-z方向に向かうベクトルであるため、次式で表すことができる。

【0048】

【数6】

$$\underline{n} = (n_1, n_2, -n_3)$$

【0049】但し、 $n_3 > 0$ である。数式6で示される表面法線ベクトル \underline{n} と微小領域上のベクトル(x,y,z-k)の内積が0であることより、次式が成立する。

【0050】

【数7】

$$\underline{n}(x,y) = (n_1(x,y), n_2(x,y), -n_3(x,y))$$

【0056】但し、表面法線ベクトル \underline{n} は単位ベクトルであるから、次式が成立する。

【0057】

【数10】

$$n_1(x,y)^2 + n_2(x,y)^2 + n_3(x,y)^2 = 1$$

$$\therefore n_3 = \{1 - n_1(x,y)^2 - n_2(x,y)^2\}^{1/2}$$

$$p(x,y) = n_1(x,y) / \{1 - n_1(x,y)^2 - n_2(x,y)^2\}^{1/2}$$

$$q(x,y) = n_2(x,y) / \{1 - n_1(x,y)^2 - n_2(x,y)^2\}^{1/2}$$

【0060】従って、数式11の関係より、レプリカ面画像の各画素位置(x,y)での表面法線ベクトル $\underline{n}(x,y)$ を求めることができるならば、その位置でのグラディエント(p(x,y), q(x,y))を求めることができる。そして、各画素位置におけるグラディエントを一定の画素方向に積分すれば、各画素位置毎にz座標の値を推定することができ、レプリカ面1の3次元形状を復元できる。

各画素位置での表面法線ベクトルの推定

前述のように、レプリカ面1をランバート面と仮定すると、レプリカ面1上の任意の微小領域における光の反射強度は、光源からの入射光(一様光)の入射角iの余弦cos iにのみ比例する。レプリカ面画像上でも同じ関係が成立し、各画素(x,y)における光の反射強度R(x,y)は、光源からの入射光の入射角i(x,y)の余弦cos i(x,y)にのみ比例し、従って、次式が成立する。

$$(x, y, z-K) \cdot (n_1, n_2, -n_3)$$

$$= n_1 x + n_2 y - n_3 (z-K) = 0$$

$$\therefore z = \frac{n_1}{n_3} x + \frac{n_2}{n_3} y + K$$

【0051】数式5と数式7より、次式が成立する。

【0052】

【数8】

$$p = n_1 / n_3$$

$$q = n_2 / n_3$$

【0053】従って、数式8の関係より、レプリカ面1上の各微小領域での表面法線ベクトル $\underline{n} = (n_1, n_2, -n_3)$ を求めることができれば、当該微小領域でのグラディエント(p, q)を求めることができる。

【0054】ここで、レプリカ面1上の各微小領域をレプリカ面画像の各画素位置(x,y)に対応させ、その位置でのグラディエントを(p(x,y), q(x,y))とし、また、数式6より、表面法線ベクトルを次式で表す。

【0055】

【数9】

【0058】数式8、数式9、及び数式10より、次式が成立する。

【0059】

【数11】

【0061】

【数12】

$$R(x,y) = r_0(x,y) \cos i(x,y)$$

【0062】但し、 $r_0(x,y)$ は、画素位置(x,y)に対応するレプリカ面1における反射率である。今、1つの光源方向ベクトル $\underline{n_s}$ (画素位置(x,y)には依存しない)が決定されれば、図2に示される関係より、次式が成立する。

【0063】

【数13】

$$\cos i(x,y) = \underline{n_s} \cdot \underline{n}(x,y)$$

【0064】従って、数式12と数式13より、次式が成立する。

【0065】

【数14】

$$R(x,y) = r_0(x,y) \{ \underline{n_s} \cdot \underline{n}(x,y) \}$$

【0066】ここで、レプリカ面1を実際に撮像して得られる各画素位置(x,y)での明度値をI(x,y)とすれば、次の方程式が成立する。

【0067】

【数15】

$$I(x,y) = c(x,y) R(x,y)$$

【0068】但し、c(x,y)は、画素位置(x,y)での正規化定数である。よって、数式14と数式15より、次の方程式が成立する。

【0069】

【数16】

$$I(x,y) = \alpha(x,y) \{ \underline{n_s} \cdot \underline{n(x,y)} \}$$

【0070】

【数17】

$$\alpha(x,y) = c(x,y) r_o(x,y)$$

【0071】数式16において、 $\alpha(x,y)$ と表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ が未知数であり、数式9と数式10より、 $\underline{n(x,y)}$ は2つの未知数 $n_1(x,y)$ と $n_2(x,y)$ を

$$N = \begin{bmatrix} \underline{n_{s1}} \\ \underline{n_{s2}} \\ \underline{n_{s3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{s11}, n_{s12}, \\ n_{s21}, n_{s22}, \\ n_{s31}, n_{s32}, \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2)^{1/2} \\ -(1 - n_{s21}^2 - n_{s22}^2)^{1/2} \\ -(1 - n_{s31}^2 - n_{s32}^2)^{1/2} \end{bmatrix}$$

【0075】また、各画素位置(x,y)における3つの明度値 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ を次式の転置ベクトル $\underline{I(x,y)}$ で表す。

$$\underline{I(x,y)} = (I_1(x,y), I_2(x,y), I_3(x,y))^T$$

【0077】但し、数式19の右辺の括弧の右肩のTは、転置を示す。数式16、数式18、及び数式19より、次式が成立する。

【0078】

【数20】

$$\underline{I(x,y)} = \alpha(x,y) N \underline{n(x,y)}$$

【0079】3つの光源方向ベクトル $\underline{n_{s1}}$ 、 $\underline{n_{s2}}$ 、及び $\underline{n_{s3}}$ が同一平面上になければ、数式18で示される行列Nの逆行列 N^{-1} が存在する。そこで、まず、表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ が単位ベクトルであることと、数式18及び数式19を用いて、係数 $\alpha(x,y)$ を、次式により求めることができる。

【0080】

【数21】

$$\alpha(x,y) = |N^{-1} \underline{I(x,y)}|$$

【0081】更に、数式21で求めた係数 $\alpha(x,y)$ 、数式9、数式10、数式18、及び数式19を用いて、表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ を、次式により求めることができる。

【0082】

【数22】

含む。従って、数式16は3つの未知数を含み、これらの未知数を決定するためには、3個の方程式が必要である。

【0072】そこで、図1に示されるように、3つの方向に配置された第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cでレプリカ面1を別々に照明し、各光源からの照明に対応してレプリカ面1を実際に撮像して得られる各画素位置(x,y)での3つの明度値と、上記3つの光源の光源方向ベクトルとについて、数式16の方程式を解くことによって、係数 $\alpha(x,y)$ 及び表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ を決定することができる。

【0073】まず、3つの光源方向ベクトル $\underline{n_{s1}}$ 、 $\underline{n_{s2}}$ 、及び $\underline{n_{s3}}$ は、それぞれ-z方向に向かう単位ベクトルであるため、数式6、数式10と同様の考えにより、次式の行列Nで表すことができる。

【0074】

【数18】

【0076】

【数19】

$$\underline{n(x,y)} = \frac{1}{\alpha(x,y)} N^{-1} \underline{I(x,y)}$$

【0083】各画素位置でのグラディエントの推定

数式22で各画素位置(x,y)での表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ が求まったら、数式11により、各画素位置(x,y)でのグラディエント(p(x,y), q(x,y))を求めることができる。

緩和法によるグラディエントの修正

上述の原理に基づいて推定されたグラディエント(p(x,y), q(x,y))は、3つの光源からの照明に対応してレプリカ面1を実際に撮像して得られるレプリカ面画像の各画素位置(x,y)での3つの明度値から推定された値であるため、多くの誤差を含んでいる。各画素位置(x,y)での誤差E(x,y)は、次式のように定義することができる。

【0084】

【数23】

$$E(x,y) = s_e(x,y) + r_e(x,y)$$

【0085】数式23において、まず、 $s_e(x,y)$ は、画素位置(x,y)におけるレプリカ面1の滑らかさの誤差を示しており、次式で定義される。

【0086】

【数24】

$$s_e(x,y) = \frac{1}{4} \{ p_x(x,y)^2 + p_y(x,y)^2 + q_x(x,y)^2 + q_y(x,y)^2 \}$$

【0087】ここで、 $p_x(x,y)$ はグラディエント $p(x,y)$ の x 座標方向の1次偏微分であり、 $p_x(x,y)^2$ はグラディエント $p(x,y)$ の x 座標方向の2乗誤差を示す。この値が小さければグラディエント $p(x,y)$ が x 座標方向に滑らかであることを示している。同様に、 $p_y(x,y)$ と $p_y(x,y)^2$ はグラディエント $p(x,y)$ の y 座標方向の1次偏微分と2乗誤差を示し、 $q_x(x,y)$ と $q_x(x,y)^2$ はグラディエント $q(x,y)$ の x 座標方向の1次偏微分と2乗誤差を示し、 $q_y(x,y)$ と $q_y(x,y)^2$ はグラディエント $q(x,y)$ の y 座標方向の1次偏微分と2乗誤差を示す。

【0088】皮膚表面に対応するレプリカ面1は局所的には滑らかであるというヒューリスティックな要請があるために、結局、数式23における誤差 $s_e(x,y)$ が小

$$r_e(x,y) = \lambda_1 \{ I_1(x,y) - c(x,y) R_1(x,y) \}^2$$

$$+ \lambda_2 \{ I_2(x,y) - c(x,y) R_2(x,y) \}^2$$

$$+ \lambda_3 \{ I_3(x,y) - c(x,y) R_3(x,y) \}^2$$

【0091】ここで、 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ は、画素位置 (x,y) においてレプリカ面1を実際に撮像して得られる3つの光源方向に対応する3つの明度値であり（数式19参照）、また、 $c(x,y) R_1(x,y)$ 、 $c(x,y) R_2(x,y)$ 、及び $c(x,y) R_3(x,y)$ は、画素位置 (x,y) において数式21により推定される係数 $\alpha(x,y)$ と数式22により推定されるグラディエント $(p(x,y), q(x,y))$ に基づいて計算される3つの光源方向に対応する3つの正規化された光の反射強度である。また、 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 は、それぞれが乗算される各光源方向の2乗誤差項の誤差 $E(x,y)$ に対する寄与率を定める定数であり、それぞれ経験的に定め

$$\frac{\partial E(x,y)}{\partial p(x,y)} = \frac{\partial s_e(x,y)}{\partial p(x,y)} + \frac{\partial r_e(x,y)}{\partial p(x,y)} = 0$$

【0095】数式26の右辺第1項は、数式24より、次式のように計算される。

されれば、画素位置 (x,y) においてレプリカ面1は滑らかであるという条件を満足することになる。

【0089】次に、数式23において、 $r_e(x,y)$ は、画素位置 (x,y) において、レプリカ面1を実際に撮像して得られる3つの光源方向に対応する3つの明度値と、推定により得られたグラディエント $(p(x,y), q(x,y))$ に基づいて計算される3つの光源方向に対応する3つの正規化された光の反射強度との2乗誤差の線形結合を示しており、数式15の方程式に基づけば、次式で定義される。

【0090】

【数25】

られる。

【0092】数式23での誤差 $r_e(x,y)$ が十分に小さいならば、前述した数式15で示される反射率に関する方程式が成立することになり、グラディエント $(p(x,y), q(x,y))$ の推定値が正しいことになる。

【0093】画素位置 (x,y) 毎に、数式23～25で定義される誤差 $E(x,y)$ を最小にするために、誤差 $E(x,y)$ をグラディエント $p(x,y)$ で偏微分して得た式を0とおくと、次式が得られる。

【0094】

【数26】

【0096】

【数27】

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial s_e(x,y)}{\partial p(x,y)} &= \frac{1}{4} \left\{ \frac{\partial \{p_x(x,y)^2\}}{\partial p(x,y)} + \frac{\partial \{p_y(x,y)^2\}}{\partial p(x,y)} + 0 + 0 \right\} \\
 &= \frac{1}{4} \left\{ \frac{\partial \{p_x(x,y)^2\}}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p(x,y)} + \frac{\partial \{p_y(x,y)^2\}}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial p(x,y)} \right\} \\
 &= \frac{1}{4} \left\{ 2 p_x(x,y) p_{xx}(x,y) \frac{1}{p_x(x,y)} \right. \\
 &\quad \left. + 2 p_y(x,y) p_{yy}(x,y) \frac{1}{p_y(x,y)} \right\} \\
 &= 2 \times \frac{1}{4} \left\{ p_{xx}(x,y) + p_{yy}(x,y) \right\}
 \end{aligned}$$

【0097】ここで、 $p_{xx}(x,y)$ は画素位置 (x,y) での
グラディエント $p(x,y)$ の x 座標方向の2次偏微分、 $p_{yy}(x,y)$ は画素位置 (x,y) でのグラディエント $p(x,y)$
の y 座標方向の2次偏微分であって、近似的に、それぞれ

$$p_{xx}(x,y) = \{p(x+1,y) - p(x,y)\} - \{p(x,y) - p(x-1,y)\}$$

$$p_{yy}(x,y) = \{p(x,y+1) - p(x,y)\} - \{p(x,y) - p(x,y-1)\}$$

【0099】即ち、 $p_{xx}(x,y)$ は近似的に、画素位置 (x,y) でのグラディエント $p(x,y)$ と、画素位置 (x,y) に x 方向に隣接する画素位置 $(x+1,y)$ 及び $(x-1,y)$ でのグラディエント $p(x+1,y)$ 及び $p(x-1,y)$ のそれぞれとで差分値を計算し、得られた2つの差分値の更に差分値を計算することによって求めることができる。 y 方向に

$$\frac{\partial s_e(x,y)}{\partial p(x,y)} = 2 \times \frac{1}{4} \left\{ 4 p_{av}(x,y) - 4 p(x,y) \right\}$$

$$= 2 \times \left\{ p_{av}(x,y) - p(x,y) \right\}$$

【0102】但し、 $p_{av}(x,y)$ は、次式で表されるように、画素位置 (x,y) の上下左右に隣接する4つの画素位置でのグラディエントの平均値である。

$$p_{av}(x,y) = \frac{1}{4} \left\{ p(x+1,y) + p(x-1,y) + p(x,y+1) + p(x,y-1) \right\}$$

【0104】一方、前述した数式26の右辺第2項は、数式25より、次式のように計算される。

れ次式で示される。

【0098】

【数28】

関する $p_{yy}(x,y)$ についても同様に求めることができる。

【0100】数式27と数式28より、次式が得られる。

【0101】

【数29】

【0103】

【数30】

【0105】

【数31】

17

18

$$\begin{aligned}
\frac{\partial r_e(x,y)}{\partial p(x,y)} &= \frac{\partial}{\partial p(x,y)} \left[\lambda_1 \{ I_1(x,y) - c(x,y) R_1(x,y) \}^2 \right] \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial p(x,y)} \left[\lambda_2 \{ I_2(x,y) - c(x,y) R_2(x,y) \}^2 \right] \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial p(x,y)} \left[\lambda_3 \{ I_3(x,y) - c(x,y) R_3(x,y) \}^2 \right] \\
&= 2 \lambda_1 \left\{ I_1(x,y) - c(x,y) R_1(x,y) \right\} \frac{\partial \{-c(x,y) R_1(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \\
&\quad + 2 \lambda_2 \left\{ I_2(x,y) - c(x,y) R_2(x,y) \right\} \frac{\partial \{-c(x,y) R_2(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \\
&\quad + 2 \lambda_3 \left\{ I_3(x,y) - c(x,y) R_3(x,y) \right\} \frac{\partial \{-c(x,y) R_3(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \\
&= -2 \left[\lambda_1 \left\{ I_1(x,y) - c(x,y) R_1(x,y) \right\} \frac{\partial \{c(x,y) R_1(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \right. \\
&\quad + \lambda_2 \left\{ I_2(x,y) - c(x,y) R_2(x,y) \right\} \frac{\partial \{c(x,y) R_2(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \\
&\quad \left. + \lambda_3 \left\{ I_3(x,y) - c(x,y) R_3(x,y) \right\} \frac{\partial \{c(x,y) R_3(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \right]
\end{aligned}$$

【0106】数式26、数式29、及び数式31より、
次の方程式が成立する。

【0107】

30 【数32】

$$2 \times \{ p_{av}(x,y) - p(x,y) \}$$

$$\begin{aligned}
&-2 \left[\lambda_1 \left\{ I_1(x,y) - c(x,y) R_1(x,y) \right\} \frac{\partial \{c(x,y) R_1(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \right. \\
&\quad + \lambda_2 \left\{ I_2(x,y) - c(x,y) R_2(x,y) \right\} \frac{\partial \{c(x,y) R_2(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \\
&\quad \left. + \lambda_3 \left\{ I_3(x,y) - c(x,y) R_3(x,y) \right\} \frac{\partial \{c(x,y) R_3(x,y)\}}{\partial p(x,y)} \right]
\end{aligned}$$

= 0

【0108】従って、グラディエント $p(x,y)$ は、次式
によって修正される。

【0109】

【数33】

19

20

$$p(x, y) = p_{av}(x, y)$$

$$\begin{aligned} & -\lambda_1 \left\{ I_1(x, y) - c(x, y) R_1(x, y) \right\} \frac{\partial \{c(x, y) R_1(x, y)\}}{\partial p(x, y)} \\ & -\lambda_2 \left\{ I_2(x, y) - c(x, y) R_2(x, y) \right\} \frac{\partial \{c(x, y) R_2(x, y)\}}{\partial p(x, y)} \\ & -\lambda_3 \left\{ I_3(x, y) - c(x, y) R_3(x, y) \right\} \frac{\partial \{c(x, y) R_3(x, y)\}}{\partial p(x, y)} \end{aligned}$$

【0110】数式33で、 $p_{av}(x, y)$ は、数式30で表されるように、画素位置 (x, y) の上下左右に隣接する4つの画素位置でのグラディエントの平均値として計算することができる。

【0111】次に、数式33で、定数 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 は、前述したように、経験的に定められる。また、数式33で、 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、及び $I_3(x, y)$ は、前述したように、画素位置 (x, y) においてレプリカ

面1を、図1の第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cの3つの光源によって実際に撮像して得られる3つの光源方向に対応する3つの明度値である。

【0112】更に、数式33において、 $c(x, y) R_1(x, y)$ は、数式14と数式17、更に数式18、数式9、及び数式10より、次式によって表される。

【0113】

【数34】

$$\begin{aligned} c(x, y) R_1(x, y) &= \alpha(x, y) \{n_{s1} \cdot n(x, y)\} \\ &= \alpha(x, y) \{n_{s11}, n_{s12}, - (1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2)^{1/2}\} \\ &\quad \cdot (n_1(x, y), n_2(x, y), - \{1 - n_1(x, y)^2 - n_2(x, y)^2\}^{1/2}) \\ &= \alpha(x, y) \{n_{s11} n_1(x, y) + n_{s12} n_2(x, y) + (1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2)^{1/2} \\ &\quad \times \{1 - n_1(x, y)^2 - n_2(x, y)^2\}^{1/2}\} \end{aligned}$$

【0114】ここで、数式11より、次式が成立する。

【数35】

【0115】

$$\begin{aligned} p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1 &= n_1(x, y)^2 / \{1 - n_1(x, y)^2 - n_2(x, y)^2\} \\ &\quad + n_2(x, y)^2 / \{1 - n_1(x, y)^2 - n_2(x, y)^2\} \\ &\quad + 1 \\ &= 1 / \{1 - n_1(x, y)^2 - n_2(x, y)^2\} \\ \therefore \{1 - n_1(x, y)^2 - n_2(x, y)^2\}^{1/2} &= 1 / \{p(x, y)^2 + q(x, y)^2\}^{1/2} \end{aligned}$$

【0116】数式35を数式11に代入することにより、次式が得られる。

【0117】

【数36】

$$\begin{aligned} n_1(x, y) &= p(x, y) / \{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1\}^{1/2} \\ n_2(x, y) &= q(x, y) / \{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1\}^{1/2} \end{aligned}$$

【0118】数式34と数式36より、数式33における項 $c(x, y) R_1(x, y)$ は、光源方向ベクトル n_{s1} の要素 n_{s11} 、 n_{s12} と、画素位置 (x, y) における係数 $\alpha(x, y)$ 及びグラディエント $(p(x, y), q(x, y))$ を用

いて、次式により計算できる。

【0119】

【数37】

21

22

 $c(x, y) R_1(x, y)$

$$= \alpha(x, y) \frac{\{n_{s11} p(x, y) + n_{s12} q(x, y) + (1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2)^{1/2}\}}{\{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1\}^{1/2}}$$

$$= \alpha(x, y) W_1 / G^{1/2}$$

10

【0120】

【0121】

【数38】

【数39】

$$G = p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1$$

$$W_1 = n_{s11} p(x, y) + n_{s12} q(x, y) + (1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2)^{1/2}$$

【0122】数式37と全く同様にして、数式33における項 $c(x, y) R_2(x, y)$ は、光源方向ベクトル $\underline{n_{s2}}$ の要素 n_{s21} 、 n_{s22} と、画素位置 (x, y) における係数 $\alpha(x, y)$ 及びグラディエント $(p(x, y), q(x, y))$ を用

い、次式と数式38により計算できる。

【0123】

【数40】

$$= \alpha(x, y) \frac{\{n_{s21} p(x, y) + n_{s22} q(x, y) + (1 - n_{s21}^2 - n_{s22}^2)^{1/2}\}}{\{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1\}^{1/2}}$$

$$= \alpha(x, y) W_2 / G^{1/2}$$

【0124】

【数41】

$$W_2 = n_{s21} p(x, y) + n_{s22} q(x, y) + (1 - n_{s21}^2 - n_{s22}^2)^{1/2}$$

【0125】同様に、数式33における項 $c(x, y) R_3(x, y)$ は、光源方向ベクトル $\underline{n_{s3}}$ の要素 n_{s31} 、 n_{s32} と、画素位置 (x, y) における係数 $\alpha(x, y)$ 及びグラディエント $(p(x, y), q(x, y))$ を用い、次式と数式38

により計算できる。

【0126】

【数42】

$$= \alpha(x, y) \frac{\{n_{s31} p(x, y) + n_{s32} q(x, y) + (1 - n_{s31}^2 - n_{s32}^2)^{1/2}\}}{\{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1\}^{1/2}}$$

$$= \alpha(x, y) W_3 / G^{1/2}$$

【0127】

【数43】

$$W_3 = n_{s31} p(x, y) + n_{s32} q(x, y) + (1 - n_{s31}^2 - n_{s32}^2)^{1/2}$$

【0128】更に、数式33において、項 $\partial \{c(x, y) R_1(x, y)\} / \partial p(x, y)$ 、 $\partial \{c(x, y) R_2(x, y)\} / \partial p(x, y)$ 、及び $\partial \{c(x, y) R_1(x, y)\} / \partial p$

(x, y) は、それぞれ数式37、数式40、及び数式42を $p(x, y)$ で偏微分することにより、次の数式44~46と、数式38、39、41、及び43によって計算で

きる。

【数44】

【0129】

$$\begin{aligned} & \partial \{c(x,y) R_1(x,y)\} / \partial p(x,y) \\ &= \alpha(x,y) \{n_{s11} \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1\} \\ & \quad - p(x,y) \{n_{s11} p(x,y) + n_{s12} q(x,y) + (1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2)^{1/2}\} \} \\ & \quad / \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1\}^{3/2} \\ &= \alpha(x,y) \{n_{s11} G - p(x,y) W_1\} / G^{3/2} \end{aligned}$$

【0130】

【数45】

$$\begin{aligned} & \partial \{c(x,y) R_2(x,y)\} / \partial p(x,y) \\ &= \alpha(x,y) \{n_{s21} \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1\} \\ & \quad - p(x,y) \{n_{s21} p(x,y) + n_{s22} q(x,y) + (1 - n_{s21}^2 - n_{s22}^2)^{1/2}\} \} \\ & \quad / \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1\}^{3/2} \\ &= \alpha(x,y) \{n_{s21} G - p(x,y) W_2\} / G^{3/2} \end{aligned}$$

【0131】

【数46】

$$\begin{aligned} & \partial \{c(x,y) R_3(x,y)\} / \partial p(x,y) \\ &= \alpha(x,y) \{n_{s31} \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1\} \\ & \quad - p(x,y) \{n_{s31} p(x,y) + n_{s32} q(x,y) + (1 - n_{s31}^2 - n_{s32}^2)^{1/2}\} \} \\ & \quad / \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1\}^{3/2} \\ &= \alpha(x,y) \{n_{s31} G - p(x,y) W_3\} / G^{3/2} \end{aligned}$$

【0132】以上、数式30、数式37～43、及び数式44～46を用いることにより、数式33で示される方程式によってグラディエント $p(x,y)$ を修正すること

ができる。

【0133】一方、数式23～25で定義される誤差 $E(x,y)$ を最小にするために、数式26～36の場合と同

様に、誤差 $E(x, y)$ がグラディエント $q(x, y)$ で偏微分される。この結果、上述のグラディエント $p(x, y)$ の場合と同様に、前述した数式37~43と、以下に示される数式48、及び数式49~51を用いることによ

$$q(x, y) = q_{av}(x, y)$$

て、次の数式47で示される方程式によってグラディエント $q(x, y)$ を修正することができる。

【0134】

【数47】

$$- \lambda_1 \left\{ I_1(x, y) - c(x, y) R_1(x, y) \right\} \frac{\partial \{c(x, y) R_1(x, y)\}}{\partial q(x, y)}$$

$$- \lambda_2 \left\{ I_2(x, y) - c(x, y) R_2(x, y) \right\} \frac{\partial \{c(x, y) R_2(x, y)\}}{\partial q(x, y)}$$

$$- \lambda_3 \left\{ I_3(x, y) - c(x, y) R_3(x, y) \right\} \frac{\partial \{c(x, y) R_3(x, y)\}}{\partial q(x, y)}$$

【0135】

$$q_{av}(x, y)$$

【数48】

$$= \frac{1}{4} \left\{ q(x+1, y) + q(x-1, y) + q(x, y+1) + q(x, y-1) \right\}$$

【0136】

【数49】

$$\partial \{c(x, y) R_1(x, y)\} / \partial q(x, y)$$

30

【0137】

【数50】

$$= \alpha(x, y) \{ n_{s12} \{ p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1 \}$$

$$- q(x, y) \{ n_{s11} p(x, y) + n_{s12} q(x, y)$$

40

$$+ \{ 1 - n_{s11}^2 - n_{s12}^2 \}^{1/2} \}$$

$$/ \{ p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1 \}^{3/2}$$

$$= \alpha(x, y) \{ n_{s12} G - q(x, y) W_1 \} / G^{3/2}$$

$$\partial \{ c(x,y) R_2(x,y) \} / \partial p(x,y)$$

$$= \alpha(x,y) \{ n_{sz2} \{ p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1 \}$$

$$- q(x,y) \{ n_{sz1} p(x,y) + n_{sz2} q(x,y) + (1 - n_{sz1}^2 - n_{sz2}^2)^{1/2} \}$$

$$/ \{ p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1 \}^{3/2}$$

$$= \alpha(x,y) \{ n_{sz2} G - q(x,y) W_2 \} / G^{3/2}$$

【0138】

【数51】

$$\partial \{ c(x,y) R_3(x,y) \} / \partial p(x,y)$$

$$= \alpha(x,y) \{ n_{sz2} \{ p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1 \}$$

$$- q(x,y) \{ n_{sz1} p(x,y) + n_{sz2} q(x,y) + (1 - n_{sz1}^2 - n_{sz2}^2)^{1/2} \}$$

$$/ \{ p(x,y)^2 + q(x,y)^2 + 1 \}^{3/2}$$

$$= \alpha(x,y) \{ n_{sz2} G - q(x,y) W_3 \} / G^{3/2}$$

【0139】上述の数式33及び数式47で示されるグラ
ラディエント $p(x,y)$ 及び $q(x,y)$ の修正方程式は、右
辺の $pav(x,y)$ 、 $qav(x,y)$ 、 $R_1(x,y)$ 、 $R_2(x,y)$
、及び $R_3(x,y)$ が修正済のグラディエントに基づい
て計算されている場合に成立する。ところが、各画素位
置でグラディエントが推定された直後の初期状態におい
ては、修正済のグラディエントは存在しない。

【0140】そこで、本発明の実施例においては、グラ
ラディエントの修正に緩和法を採用する。即ち、グラデ
リエントの推定値を初期値として計算される $pav(x,y)$ 、
 $qav(x,y)$ 、 $R_1(x,y)$ 、 $R_2(x,y)$ 、及び $R_3(x,y)$
に基づいて数式33及び数式47を計算することによ
り、各画素位置 (x,y) でのグラディエント $(p(x,y)$ 、
 $q(x,y))$ を修正し、その修正されたグラディエントか
ら計算される $pav(x,y)$ 、 $qav(x,y)$ 、 $R_1(x,y)$ 、 R_2
 (x,y) 、及び $R_3(x,y)$ に基づいて、数式33及び数
式47で、各画素位置 (x,y) でのグラディエント $p(x,$
 $y)$ 及び $q(x,y)$ を更に修正するという処理を繰り返
す。

【0141】この結果、各画素位置 (x,y) でのグラデ
リエント $(p(x,y)$ 、 $q(x,y))$ は、徐々に妥当な値に収

束する。このとき、各繰り返しに先立って、前回修正さ
れたグラディエント $(p(x,y)$ 、 $q(x,y))$ に基づい
て、数式23によって各画素位置 (x,y) での誤差 $E(x,$
 $y)$ を計算し、この誤差の全画素の和が十分に小さくな
った時点で、グラディエント $(p(x,y)$ 、 $q(x,y))$ の
値が収束したと判定すればよい。

【0142】なお、数式23の誤差 $E(x,y)$ の計算にお
いて、 $s_e(x,y)$ は数式24によって計算でき、このと
き、 $px(x,y)$ 、 $py(x,y)$ 、 $qx(x,y)$ 、及び $qy(x,y)$ は、
次式によって計算できる。

【0143】

【数52】

$$p_x(x,y) = p(x+1,y) - p(x-1,y)$$

$$p_y(x,y) = p(x,y+1) - p(x,y-1)$$

$$q_x(x,y) = q(x+1,y) - q(x-1,y)$$

$$q_y(x,y) = q(x,y+1) - q(x,y-1)$$

【0144】また、数式23の誤差 $E(x,y)$ の計算において、 $r_e(x,y)$ は数式25によって計算できる。このとき、前述したように、 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ は、前述したように、画素位置 (x,y) においてレプリカ面1を図1の第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cの3つの光源により実際に撮像して得られる3つの光源方向に対応する3つの明度値であり、 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 はそれぞれ経験的に定められる定数であり、 $c(x,y)$ 、 $R_1(x,y)$ 、 $c(x,y)$ 、 $R_2(x,y)$ 、及び $c(x,y)$ 、 $R_3(x,y)$ は、数式37~43により計算できる。

<本発明による皮膚表面形状の特徴抽出装置の具体的な動作>上述の3次元形状復元の原理に基づく図1の皮膚表面形状の特徴抽出装置の具体的な動作について、以下に順次説明する。なお、以下の動作フローチャートは、図1のCPU8がROM10に記憶された制御プログラムを実行する動作として実現される。

全体動作

図3は、皮膚表面形状の特徴抽出装置の全体的な処理を示す動作フローチャートである。

【0145】まず、ステップS301で、3枚のレプリカ面画像が入力され、メモリ9に取り込まれる。次に、ステップS302で、メモリ9に取り込まれた3枚のデジタル画像データの各画素位置の明度値から、レプリカ面画像の各画素位置 (x,y) でのレプリカ面1のグラデーション $(p(x,y), q(x,y))$ が計算される。

【0146】そして、ステップS303で、上述のグラデーション $(p(x,y), q(x,y))$ から、皮膚表面形状の特徴パラメータが抽出される。

レプリカ面画像の入力

図4は、図3のステップS301のレプリカ面画像の入力処理の動作フローチャートである。

【0147】まず、ステップS401で、CPU8はバス7を介してスイッチ6を制御し、第1光源2Aを点灯させる。次に、ステップS402で、A/D変換器5から得られるデジタル画像データを、バス7を介してメモリ9の第1の画像格納領域に順次取り込む。

【0148】次に、ステップS403で、CPU8はバス7を介してスイッチ6を制御し、第2光源2Bを点灯

させる。そして、ステップS404で、A/D変換器5から得られるデジタル画像データを、バス7を介してメモリ9の第2の画像格納領域に順次取り込む。

【0149】更に、ステップS405で、CPU8はバス7を介してスイッチ6を制御し、第3光源2Cを点灯させる。そして、ステップS406で、A/D変換器5から得られるデジタル画像データを、バス7を介してメモリ9の第3の画像格納領域に順次取り込む。

【0150】以上の処理によって、メモリ9には、レプリカ面1上の撮像領域の各画素位置 (x,y) 毎に、3つの明度値 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ のデータが得られる。

各画素位置でのグラデーションの計算

図5は、図3のステップS302の、レプリカ面画像の各画素位置 (x,y) でのレプリカ面1のグラデーション $(p(x,y), q(x,y))$ の計算処理の動作フローチャートである。

【0151】まず、ステップS501で、数式18及び数式19を用いて数式21を計算することにより、各画素位置 (x,y) での係数 $\alpha(x,y)$ が推定される。なお、数式18で示される3つの光源方向ベクトル $\underline{n_{s1}}$ 、 $\underline{n_{s2}}$ 、及び $\underline{n_{s3}}$ は、第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cが設置された時点で決定することができ、予めメモリ9に記憶されている。また、数式19で示される各画素位置 (x,y) の3つの明度値 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ は、図3のステップS303(図4参照)の処理でメモリ9の第1~第3の画像領域に得られている。

【0152】次に、ステップS502で、ステップS501で得られた各画素位置 (x,y) での係数 $\alpha(x,y)$ と、数式9、数式10、数式18、及び数式19を用いて数式22を計算することによって、各画素位置 (x,y) での表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ が推定される。

【0153】次に、ステップS503で、ステップS502で求めた各画素位置 (x,y) での表面法線ベクトル $\underline{n(x,y)}$ に基づいて、数式11により、各画素位置 (x,y) でのグラデーション $(p(x,y), q(x,y))$ が推定される。

【0154】続いて、ステップS504~S509の緩和法の処理が実行される。まず、ステップS504で、ステップS503で求めた各画素位置 (x,y) でのグラデーション $(p(x,y), q(x,y))$ が、緩和法の繰り返し演算の $p(x,y)$ 及び $q(x,y)$ の初期値として、メモリ9の適当な変数領域に設定される。

【0155】次に、ステップS505で、上述のグラデーション $(p(x,y), q(x,y))$ の前の値(初回の場合はステップS504で設定された初期値、それ以後はステップS508とS509で計算された値)に基づいて、数式24、数式52、数式25、及び数式37~43を用いて数式23を計算することにより、各画素位置

(x,y) での誤差 $E(x,y)$ が計算される。ここで、数式 52 の右辺は、各画素位置 (x,y) の上下左右に隣接する 4 つの画素位置でのグラディエントの前の値に基づいて計算される。また、数式 38 の右辺は、グラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) の前の値に基づいて計算され、数式 39、41、43 の右辺はグラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) の前の値と、予めメモリ 9 に記憶されている 3 つの光源方向ベクトル $\underline{n_{s1}}$ 、 $\underline{n_{s2}}$ 、及び $\underline{n_{s3}}$ の各要素に基づいて計算され、更に、数式 37、40、42 の右辺は、上述の数式 38、39、41、及び 43 の計算結果と、ステップ S 501 で計算された係数 $\alpha(x,y)$ に基づき計算される。また、数式 25 で、定数 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 は、前述したように経験的に定められて予めメモリ 9 に得られており、 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ は、図 3 のステップ S 303 (図 4 参照) の処理でメモリ 9 の第 1～第 3 の画像領域に得られている。

【0156】続いて、ステップ S 506 においては、ステップ S 505 で計算された各画素位置 (x,y) での誤差 $E(x,y)$ の全画素についての総和が計算される。そして、ステップ S 507 では、ステップ S 506 で計算された誤差の総和が所定の閾値以下になったか否かが判定される。

【0157】ステップ S 507 の判定が NO なら、ステップ S 508 と S 509 で、グラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) が修正される。即ち、ステップ S 508 では、ステップ S 505 における数式 37～43 の計算結果と、数式 30、及び数式 44～46 を用いて数式 33 が計算されることにより、グラディエント $p(x,y)$ が修正される。ここで、数式 30 の右辺は、各画素位置 (x,y) の上下左右に隣接する 4 つの画素位置でのグラディエントの前の値の平均値として計算される。また、数式 44～46 の右辺は、ステップ S 505 で計算された数式 38、39、41、及び 43 の計算結果と、グラディエント $p(x,y)$ の前の値と、予めメモリ 9 に記憶されている 3 つの光源方向ベクトル $\underline{n_{s1}}$ 、 $\underline{n_{s2}}$ 、及び $\underline{n_{s3}}$ の各第 1 要素と、ステップ S 501 で計算された係数 $\alpha(x,y)$ に基づいて計算される。更に、数式 33 で、定数 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 は、前述したように経験的に定められて予めメモリ 9 に得られており、 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ は、図 3 のステップ S 303 (図 4 参照) の処理でメモリ 9 の第 1～第 3 の画像領域に得られている。

【0158】また、ステップ S 509 では、ステップ S 505 における数式 37～43 の計算結果と、数式 48、及び数式 49～51 を用いて数式 47 が計算されることにより、グラディエント $q(x,y)$ が修正される。ここで、数式 48 の右辺は、各画素位置 (x,y) の上下左右に隣接する 4 つの画素位置でのグラディエントの前の値の平均値として計算される。また、数式 49～51 の右

辺は、ステップ S 505 で計算された数式 38、39、41、及び 43 の計算結果と、グラディエント $q(x,y)$ の前の値と、予めメモリ 9 に記憶されている 3 つの光源方向ベクトル $\underline{n_{s1}}$ 、 $\underline{n_{s2}}$ 、及び $\underline{n_{s3}}$ の各第 2 要素と、ステップ S 501 で計算された係数 $\alpha(x,y)$ に基づいて計算される。更に、数式 47 で、定数 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 は、前述したように経験的に定められて予めメモリ 9 に予め得られており、 $I_1(x,y)$ 、 $I_2(x,y)$ 、及び $I_3(x,y)$ は、図 3 のステップ S 303 (図 4 参照) の処理でメモリ 9 の第 1～第 3 の画像領域に得られている。

【0159】その後、ステップ S 505、S 506 が再び実行されて各画素位置 (x,y) での誤差 $E(x,y)$ 及びその誤差の全画素位置についての総和が計算され、ステップ S 507 でその誤差の総和が所定の閾値以下になっていないと判定される間はステップ S 508～S 507 の処理が繰り返される。

【0160】そして、ステップ S 507 で上述の誤差の総和が所定の閾値以下になったと判定されると、各画素位置 (x,y) でのグラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) は妥当な値に収束したといえるため、ステップ S 510 で、最終的に得られた各画素位置 (x,y) でのグラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) がメモリ 9 に格納され、これにより、図 3 のステップ S 302 の処理を終了する。

鳥瞰図による考察

次に、図 3 のステップ S 303 の皮膚表面形状の特徴パラメータの抽出処理について説明する前に、上述の処理によって得られた各画素位置 (x,y) におけるグラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) に基づいて復元されるレプリカ面 1 の 3 次元形状の例について説明する。

【0161】各画素位置 (x,y) でのグラディエント ($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$) を求めることができれば、それらをレプリカ面画像上で一定の方向に積分することによって、各画素位置 (x,y) における z 座標の値を求めることができ、レプリカ面 1 の 3 次元形状を復元することができる。

【0162】図 6 は、そのようにして復元されたレプリカ面 1 の 3 次元形状を鳥瞰図として示した図である。この図からわかるように、皮膚領域では、グラディエントが大きく変化することにより、-z 方向に V 字型に切れ込んでいることがわかる。

【0163】また、皮溝と皮溝の交点付近においても、グラディエントが大きく変化することにより、-z 方向に特徴的な形状を呈することがわかる。これに対して、皮丘領域ではグラディエントの変化が少なく、平面に近い形状を呈する。

皮膚占有率の抽出

以上の考察に基づく、図 3 のステップ S 303 の皮膚表面形状の特徴パラメータの抽出処理について、図 7 の動作フローチャートに沿って説明する。

【0164】まず、ステップ S 701 では、皮溝占有率

10

20

30

40

50

が抽出される。皮溝占有率は、皮溝領域のレプリカ面画像全体に対する面積率で定義され、皮溝と皮溝の交点（毛孔を含む）の領域も皮溝に含まれる。

【0165】ここでの処理の動作フローチャートを図8に示す。図8において、まず、ステップS801で、各画素位置(x,y)毎に、図3のステップS302で計算さ

$$(\text{グラディエント強度}) = \{p(x,y)^2 + q(x,y)^2\}^{1/2}$$

【0167】次に、ステップS802で、所定の閾値以上のグラディエント強度を有する画素位置(x,y)が抽出され、その画素に当該画素が皮溝であることを示すラベルが付与される。この結果、レプリカ面画像において皮溝領域の画素が抽出される。なお、数式53で用いられる各画素位置(x,y)でのグラディエント(p(x,y)、q(x,y))は、前述したように緩和法のアルゴリズムによって決定された値であるため、上述のような簡単な閾値

$$(\text{皮溝占有率}) = (\text{皮溝領域の画素数}) / (\text{総画素数})$$

【0170】以上のようにして計算される皮溝占有率は、皮溝と皮溝の交点（毛孔を含む）の領域の広さを示す特徴パラメータとなる。一般に、人間の皮膚は、加齢と共に、皮溝の密度が減少するため、上述のようにして皮溝占有率を直接評価できることは重要である。

皮溝方向の標準偏差及びヒストグラムの抽出

図7のステップS702では、皮溝方向の標準偏差及びヒストグラムが抽出される。皮溝方向は皮溝の長手方向として定義される。

$$(\text{グラディエント方向}) = \tan^{-1} \{q(x,y) / p(x,y)\}$$

【0173】皮溝領域におけるグラディエント方向は、皮溝方向に垂直な方向、即ち皮溝の幅方向を示す。従って、ステップS902で、次式により上述のグラディエント方向に $\pi/2$ [rad]が加算され、その結果、皮溝方向が抽出される。

【0174】

【数56】

$$(\text{皮溝方向}) = (\text{グラディエント方向}) + \pi/2$$

【0175】そして、ステップS903では、このようにして求めた各画素位置(x,y)における皮溝方向について、皮溝領域全体の標準偏差及びヒストグラムが計算されて、その計算結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0176】以上のようにして求まる皮溝方向の標準偏差が小さい場合、レプリカ面画像全体において皮溝が一定方向に流れていることを示し、標準偏差が大きい場合、レプリカ面画像全体において皮溝が縦横に走っていることを示している。また、ヒストグラムを検査することにより、皮溝方向の分布も抽出することができる。

【0177】一般に、人間の皮膚は、加齢と共に、皮溝

れたグラディエント(p(x,y)、q(x,y))を用いて、次式によりグラディエント強度が計算される。この物理量は、各画素位置(x,y)でのレプリカ面1の傾きの強さを示している。

【0166】

【数53】

処理によって容易に皮溝領域を検出できる。

【0168】最後に、ステップS803で、次式により皮溝占有率が計算され、その計算結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0169】

【数54】

【0171】ここでの処理の動作フローチャートを図9に示す。図9において、まず、ステップS901で、図8のステップS802で求めた皮溝領域の画素(x,y)について、次式によってグラディエント方向が計算される。このグラディエント方向は、例えば $-\pi/2$ から $\pi/2$ [rad]の範囲で計算される。

【0172】

【数55】

に関する放射状の均質性が失われ、皮溝が一定方向に流れる傾向を呈するため、上述のようにして皮溝方向を直接評価できることは重要である。

皮溝底の深さの平均と標準偏差及びヒストグラムの抽出
図7のステップS703では、皮溝底の深さの平均と標準偏差及びヒストグラムが抽出される。皮溝底の深さは皮溝の形状を決定する最も重要なパラメータである。

【0178】今、図2より、レプリカ面1に関する座標は図10のように定義されるため、例えば皮溝領域における深さの空間1次微分であるグラディエント(p(x,y)、q(x,y))の符号及び深さの空間2次微分であるラプラシアンは図面のようにになる。このような性質を利用して、図11の動作フローチャートで示されるアルゴリズムにより皮溝底の画素とその深さに関する情報が抽出される。

【0179】図11において、まず、ステップS1101で、レプリカ面画像の各画素位置(x,y)毎にレプリカ面1の深さの空間2次微分、即ち、ラプラシアンが計算される。ここで、深さ値は直接には求まっていないため、グラディエントp(x,y)及びq(x,y)の空間1次微分 $p_x(x,y)$ 及び $q_y(x,y)$ を計算し、それらの線形結合を求めることにより、ラプラシアンを計算することができ

る。なお、 $p_x(x,y)$ 及び $q_y(x,y)$ は、図3のステップS302に関する図5のステップS505で数式52により計算されるため、ステップS505の計算時に次式を同時に計算し、その計算結果をラプラシアンとしてメモリ9に記憶させておけばよい。

【0180】

【数57】

$$(\text{ラプラシアン}) = p_x(x,y) + q_y(x,y)$$

【0181】次に、ステップS1102で、レプリカ面画像全体で、ラプラシアンが所定の閾値以上の正の極大値となる画素が探索され、それを満たす1つの画素が皮溝底の画素候補として抽出される。

【0182】皮溝底の画素候補が見つかったと、ステップS1103の判定がYESとなり、次に、ステップS1104において、皮溝底の画素候補の周囲の直近画素内に、図7のステップS701に関する図8のステップS802で求まっている皮溝領域が存在するか否かが探索される。

【0183】皮溝領域が見つからない場合には、当該皮溝底の画素候補は皮溝底の画素ではないと判定できるため、ステップS1105の判定結果がNOとなってステップS1102に戻る。一方、皮溝領域が見つかった場合には、当該皮溝底の画素候補は皮溝底の画素であると判定できるため、ステップS1105の判定結果がYESとなって、ステップS1106に進む。

【0184】ステップS1106では、上述の皮溝画素候補が皮溝画素としてラベル付けされる。続いて、ステップS1107とS1108において、積分に関する処理が実行される。今、図10に示されるように、皮溝底の画素での深さは、皮溝底の画素から、それが含まれる皮溝の端の画素までの高さであると定義できる。そこで、皮溝底の画素から皮溝の端の画素までグラディエントを積分することにより、皮溝底の画素の深さを求めることができる。

【0185】まず、ステップS1107で、積分方向をx方向とするかy方向とするかが決定される。即ち、ステップS1104において検出された皮溝領域内の所定範囲の画素のグラディエント($p(x,y)$ 、 $q(x,y)$)の平均値が計算され、 $p(x,y)$ の平均値の方が大きければ、その皮溝底の画素が含まれる皮溝領域の皮溝方向は図12に示されるようにy方向に近い方向を向いていると推定できるため、探索が皮溝の幅方向に近い方向に対して行われるように、x方向が探索方向として決定される。逆に、 $q(x,y)$ の平均値の方が大きければ、その皮溝底の画素が含まれる皮溝領域の皮溝方向は図13に示されるようにx方向に近い方向を向いていると推定できるため、探索が皮溝の幅方向に近い方向に対して行われるように、y方向が探索方向として決定される。これにより、皮溝方向に積分が行われてしまい、積分路が皮溝から抜け出せなくなってしまうという事態を防ぐことが

できる。

【0186】また、ステップS1107では、上述のように決定されたx方向又はy方向において、有効な明度値が得られている正又は負の何れかの方向を積分方向とする判別も行われる。これは、光源の照明方向と皮溝方向との関係で、照明の影になる部分が生じる可能性があり、その影の部分ではグラディエントが正しく求まっていない可能性があるため、そのような影の部分が含まれる方向を避けるためである。有効な明度値が得られているか否かは、例えば、第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cによるレプリカ面1の各照明動作に対応してメモリ9に格納された3枚の画像データのそれぞれにつき、画像全体の明度値の分布を調べ閾値処理を行うことにより、各画素毎に有効な明度値が得られているか否かを予めラベル付けしておく等の処理を行うことで、判別することができる。

【0187】ステップS1108では、ステップS1107で決定された積分方向に、図7のステップS701に関する図8のステップS802で求まっている皮溝領域の範囲で積分処理が実行される。この場合、x方向に積分が行われる場合にはグラディエント $p(x,y)$ が積分され、y方向に積分が行われる場合にはグラディエント $q(x,y)$ が積分される。

【0188】積分の結果得られた積分値は、ステップS1109で、当該皮溝底の画素での深さとしてメモリ9に記憶される。その後、再びステップS1102に戻り、レプリカ面画像上で、ラプラシアンが所定の閾値以上の正の極大値となる画素が更に探索され、それを満たす1つの画素が皮溝底の画素候補として抽出され、それに対してステップS1104～S1109の処理が繰り返される。

【0189】ラプラシアンが所定の閾値以上の正の極大値となる画素が見つからなくなったら、ステップS1103の判定がNOとなり、ステップS1110に進む。ステップS1110では、ラベル付けされた皮溝底の画素の深さのレプリカ面画像全体での平均と標準偏差及びヒストグラムが計算され、その計算結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0190】一般に、人間の皮膚は、加齢と共に、皮溝の深さは浅くなり皮溝が不鮮明となるため、上述のようにして皮溝の深さを直接評価できることは重要である。
皮溝幅の平均と標準偏差及びヒストグラムの抽出
図7のステップS704では、皮溝幅の平均と標準偏差及びヒストグラムが抽出される。

【0191】ここでの処理の動作フローチャートを図14に示す。まず、ステップS1401で、前述した図7のステップS703に関する図11のステップS1106で抽出された皮溝底の画素毎に、前述した図11のステップS1108で実行された積分処理における積分画

素数が抽出される。なお、積分画素数は、例えば、ステップS1108の積分処理が実行されるときにカウントし、積分終了時にステップS1109において、皮溝底の画素に対応させてメモリ9に記憶させておけばよい。

【0192】次に、ステップS1402で、上述の積分画素数に基づいて、皮溝底の画素毎に皮溝幅が計算され
(皮溝底の画素での皮溝幅)

$$= 2 \times (\text{皮溝底の画素での積分画素数})$$

$$\times (\text{積分路上の平均のグラディエント方向の余弦値})$$

【0194】また、図11のステップS1108でy方向に積分が実行された場合、皮溝底の画素での積分画素数と、そこでの皮溝幅との関係は、図16に示される。そこで、次式により皮溝底の画素での皮溝幅が計算され
(皮溝底の画素での皮溝幅)

$$= 2 \times (\text{皮溝底の画素での積分画素数})$$

$$\times (\text{積分路上の平均のグラディエント方向の正弦値})$$

【0196】ここで、数式58又は数式59で使用される積分路上の平均のグラディエント方向は、例えば、ステップS1108の積分処理が実行されるときに、積分される画素について図7のステップS702に関する図9のステップS901で計算されているグラディエント方向を加算し、積分終了時にステップS1109においてその加算値を積分画素数で除算することにより求めることができ、ステップS1109において、そのようにして求めたグラディエント方向の平均値を皮溝底の画素に対応させてメモリ9に記憶させておけばよい。

【0197】皮溝幅は、皮溝底の深さと共に、人間の皮膚の加齢状態を知るための指標となるため、上述のようにして皮溝幅を直接評価できることは重要である。

皮溝セグメントの抽出

図7のステップS705では、皮溝底の画素を結ぶ線分、即ち、皮溝セグメントが抽出される。

【0198】ここでの処理の動作フローチャートを図17に示す。まず、ステップS1701で、前述した図7のステップS703に関する図11のステップS1106で抽出された皮溝底の画素毎に皮溝セグメントのラベルが付与される。

【0199】この場合、図18又は図19に示されるような各種オペレータの中央の黒丸で示される画素を現在着目している皮溝底の画素に合わせ、その周辺の白丸で示される画素のみに皮溝底の画素が存在するか否かを判別することにより、ラベル付けが行われる。

【0200】ここで、図18に示される何れかのオペレータが適合した場合、現在着目している皮溝底の黒丸画素は、皮溝セグメントの途中の画素である。そして、白丸の何れの画素にもラベルが付与されていない場合は、

る。前述した図11のステップS1108でx方向に積分が実行された場合、皮溝底の画素での積分画素数と、そこでの皮溝幅との関係は、図15に示される。そこで、次式により皮溝底の画素での皮溝幅が計算される。

【0193】

【数58】

れ、その計算結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0195】

【数59】

現在着目している皮溝底の黒丸画素及び白丸で示される他の皮溝底の画素に、新たな共通のラベルが付与されて、その情報をメモリ9に記憶される。また、白丸の何れかの画素にラベルが付与されている場合は、そのラベルを現在着目している皮溝底の黒丸画素及び他の白丸で示される皮溝底の画素に付与され、その情報がメモリ9に記憶される。

【0201】一方、図19に示される何れかのオペレータが適合した場合、現在着目している皮溝底の黒丸画素は、皮溝セグメントの端点の画素である。そして、白丸の画素にラベルが付与されていない場合は、現在着目している皮溝底の黒丸画素と白丸で示される他の皮溝底の画素に、新たな共通のラベルが付与され、その情報がメモリ9に記憶される。また、白丸の画素にラベルが付与されている場合は、そのラベルを現在着目している皮溝底の黒丸画素に付与され、その情報がメモリ9に記憶される。更に、現在着目している皮溝底の黒丸画素に付与されたラベルに対応させて、当該黒丸画素の位置と、その位置が当該ラベルが付与されている皮溝セグメントの端点であることを示す情報がメモリ9に記憶される。

【0202】次に、ステップS1702で、各ラベルの種類毎に、当該ラベルに対応する皮溝セグメントの両端の端点位置の情報がメモリ9から読み出されて、2つの端点位置間の直線距離が計算され、その計算結果が当該ラベルに対応する皮溝セグメントの長さ(皮溝セグメント長)として抽出され、当該ラベルに対応させてメモリ9に記憶される。

【0203】続いて、ステップS1703で、メモリ9から、ラベルの種類の数を読み出され、その数がレプリカ画像中の皮溝セグメントの本数として抽出され、そ

の結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0204】更に、ステップS1704で、メモリ9から、ステップS1702で抽出された皮溝セグメント長が読み出され、それらの平均と標準偏差及びヒストグラムが抽出され、その結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0205】一般に、人間の皮膚は、加齢と共に、皮溝の数は減少し、皮溝の長さは長くなるため、上述のようにして皮溝セグメントの本数及び皮溝セグメント長を直接評価できることは重要である。

毛孔の存在率、深さ、及び大きさの抽出

最後に、図7のステップS706では、皮溝セグメントの交点における毛孔の存在率、深さ、及び大きさが抽出される。

【0206】ここでの処理の動作フローチャートを図20に示す。始めに、ステップS2001では、皮溝セグメントの交点の領域（交点領域）が抽出される。

【0207】そのために、まず、図7のステップS701で抽出された皮溝領域の画素のうち、図7のステップS703に関する図11のステップS1106で抽出された皮溝底画素について図11のステップS1108で実行された積分処理の対象とならなかった画素が、交点領域の候補として抽出される。今、図21の斜線部として示されるように、皮溝の交点領域は皮溝底の積分処理の対象とならない可能性が強い。従って、上述のように抽出された交点領域の候補に交点領域が含まれると推定することができる。

【0208】次に、交点領域の候補が連続する領域毎に分割されてそれぞれにラベルが付され、その情報がメモリ9に記憶される。続いて、図7のステップS705で抽出されメモリ9に記憶されている各皮溝セグメントの各端点位置毎に、その端点位置から所定範囲内に上述の交点領域の候補が存在するか否かが判定され、存在する場合には、当該交点領域の候補のラベルに当該皮溝セグメントのラベルが対応付けられ、その情報がメモリ9に記憶される。

【0209】上述の処理の後、2つ以上の皮溝セグメントのラベルが付与されている交点領域の候補が交点領域として抽出され、その情報（ラベル）がメモリ9に記憶される。

【0210】ステップS2002では、ステップS2001で抽出された各交点領域の深さが抽出される。まず、各交点領域毎に、それに接続されている1つの皮溝セグメントが決定される。

【0211】そして、決定された皮溝セグメントの当該交点領域側の端点位置の皮溝底画素について、図7のステップS703で抽出された当該皮溝底画素の深さ情報がメモリ9から読み出され、その深さを初期値として、

当該皮溝底画素から交点領域の側に向かって、各画素位置のグラディエントが積分される。

【0212】この場合に各画素位置では、 $p(x,y)$ 及び $q(x,y)$ のうち、負の符号を有し絶対値が大きい方のグラディエントが選択されて積分され、 $p(x,y)$ が積分された場合には+ x 方向に1画素移動し、 $q(x,y)$ が積分された場合には+ y 方向に1画素移動して、更に積分処理が繰り返される。

【0213】そして、深さが最も深くなった時点で積分処理を終了し、その深さ情報が交点深さ情報の候補としてメモリ9に記憶される。上述の積分処理は、現在着目している交点領域に接続されている全ての皮溝セグメントについて同様に実行される。そして、全ての皮溝セグメントについて得られた交点深さ情報の候補のうち最も深さの深い値が、現在着目している交点領域の深さとして抽出される。

【0214】続いて、ステップS2003では、ステップS2001で抽出された交点領域のそれぞれについて、ステップS2002で抽出された当該交点領域の深さが所定の閾値より深いかが判定されることにより、当該交点領域が毛孔か否かが判定される。毛孔は一般に深く切れ込んでおり、一方、毛孔でない単なる交点の深さは皮溝底の深さと余り変らない。従って、交点領域の深さを判定することにより毛孔を抽出することができる。毛孔と判定された交点領域については、毛孔である旨のラベルが付され、その情報がメモリ9に記憶される。

【0215】更に、ステップS2004では、ステップS2003で抽出された毛孔について、その大きさが抽出される。交点領域においては、それに接する皮溝セグメントは各皮溝の皮溝幅で接するとモデル化できるため、毛孔の交点領域について、それに接する各皮溝セグメントの皮溝幅によって囲まれた交点領域の画素数を適当なアルゴリズムで抽出することにより、毛孔の大きさを抽出できる。このように検出された毛孔の大きさの情報は、メモリ9に記憶される。

最後に、ステップS2006では、ステップS2001で抽出された交点領域の数に対するステップS2003で抽出された毛孔の数の割合が毛孔の存在率として抽出され、更に、毛孔の深さの平均と標準偏差及びヒストグラム、毛孔の大きさの平均と標準偏差及びヒストグラムが抽出され、その結果が、メモリ9に格納されると共にプリンタ11又はCRTディスプレイ12に出力される。

【0216】一般に、毛孔は、人間の皮膚の加齢状態を知るための指標となり、例えば毛孔の大きさは加齢と共に大きくなる傾向を呈するため、上述のようにして毛孔を直接評価できることは重要である。

【0217】以上説明した皮膚表面形状の特徴抽出装置によれば、レプリカ面1の3次元形状をグラディエント

を介して抽出できることにより、皮膚占有率、皮膚方向、皮膚の深さ、皮膚幅、皮膚セグメントの本数及び皮膚セグメント長、並びに毛孔の存在率、深さ及び大きさなどを、詳細に評価することができるようになる。

＜他の実施例＞なお、図1のCRTディスプレイ12に、図6に示されるようなレプリカ面1の3次元形状の鳥瞰図を演算し表示させるように構成してもよい。

【0218】また、図3のステップS302のグラディエントの計算処理に関する図5の動作フローチャートにおいて、光源の照明方向と皮膚方向との関係で照明の影になる部分については、グラディエント ($p(x,y)$, $q(x,y)$) の推定及び緩和法による修正は行わないようにすることにより、グラディエントの計算精度を高めることができる。この場合、図7のステップS703に関する図11のステップS1108の積分処理が実行される際に、ステップS1107において積分方向として有効な明度値が得られている方向のみが選択されるように処理されるため、皮膚底画素の深さの計算などにおいて不都合は生じない。

【0219】更に、上述の実施例では、レプリカ面1は、第1光源2A、第2光源2B、及び第3光源2Cの3つの光源によって照明されたが、もっと多くの光源によって照明を行い、各画素位置毎に、影を生じない照明に対応する3つの明度値を選択してグラディエントを推定及び緩和法により修正するようにすれば、全ての画素位置のグラディエントを正確に求めることも可能である。

【0220】加えて、1つの光源をレプリカ面1の周囲で回転させながら複数回照明するように構成することも可能である。なお、数式23の誤差 $E(x,y)$ を計算するための数式25の λ_1 、 λ_2 、 λ_3 は、前述したように、各々が乗算される各光源方向の2乗誤差項の誤差 $E(x,y)$ に対する寄与率を定める定数であり、上述の実施例では経験的に定められるようにしたが、例えば、レプリカ面画像の入力状態に応じてダイナミックに変化させてもよい。

【0221】一方、上述の実施例ではレプリカ面画像から皮膚表面形状の特徴を抽出するようにしたが、条件によって、皮膚表面を直接撮像した画像から皮膚表面形状の特徴を抽出するようにしてもよい。

【0222】更に、上述の実施例で説明した皮膚表面形状の特徴パラメータを抽出するためのアルゴリズムは一例であり、他にも様々なアルゴリズムが適用可能である。例えば、皮膚占有率の計算において、元々の明度値の画像データを組合せて判定したり、皮膚領域の端ではラプラシアンが変化(図10では負に変化)する事実を利用したり、更に、皮膚セグメントを皮膚領域全体の領域分割の手法によって抽出したりするアルゴリズムが考えられる。

【0223】

【発明の効果】本発明によれば、皮膚表面形状の3次元形状を各画素位置での勾配を介して抽出できるため、皮膚の形状の領域、面積、方向、深さ、幅、長さ、又は数に関する特徴情報、或いは、皮膚の交点領域の形状の領域、そこでの毛孔の存在する割合、毛孔の深さ、又は大きさに関する特徴情報などを詳細に評価することが可能となる。

【0224】このように、本発明は、従来間接的にしか評価できなかった皮膚表面形状の特徴を、その形状を直接示す特徴情報によって評価できるようになるため、評価誤差を大幅に軽減することが可能となる。

【0225】また、本発明の構成は、小型の撮像装置と、携帯型のマイクロコンピュータなどによって容易に実現できるため、詳細な客観的評価を誰でも容易に得ることが可能となり、医院、又は薬局や化粧品店等の店頭などにおいて手軽に使用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による皮膚表面形状の特徴抽出装置の構成図である。

【図2】3次元形状復元の原理に関する説明図である。

【図3】皮膚表面形状の特徴抽出装置の全体的な処理を示す動作フローチャートである。

【図4】レプリカ面画像の入力処理の動作フローチャートである。

【図5】各画素位置でのグラディエントの計算処理の動作フローチャートである。

【図6】レプリカ面1の3次元形状の鳥瞰図である。

【図7】皮膚表面形状の特徴パラメータの抽出処理の動作フローチャートである。

【図8】皮膚占有率の抽出処理の動作フローチャートである。

【図9】皮膚方向の標準偏差及びヒストグラムの抽出処理の動作フローチャートである。

【図10】皮膚の形状とラプラシアンとの関係の説明図である。

【図11】皮膚底の深さの平均と標準偏差及びヒストグラムの抽出処理の動作フローチャートである。

【図12】積分方向の決定処理の説明図(その1)である。

【図13】積分方向の決定処理の説明図(その2)である。

【図14】皮膚幅の平均と標準偏差及びヒストグラムの抽出処理の動作フローチャートである。

【図15】皮膚底の画素での積分画素数と皮膚幅の関係の説明図(その1)である。

【図16】皮膚底の画素での積分画素数と皮膚幅の関係の説明図(その2)である。

【図17】皮膚セグメントの抽出処理の動作フローチャートである。

【図18】皮膚セグメントを抽出するためのオペレータ

を示した図(その1)である。

【図19】皮溝セグメントを抽出するためのオペレータを示した図(その2)である。

【図20】毛孔の存在率、深さ、及び大きさの抽出処理の動作フローチャートである。

【図21】交点領域の抽出処理の動作フローチャートである。

【符号の説明】

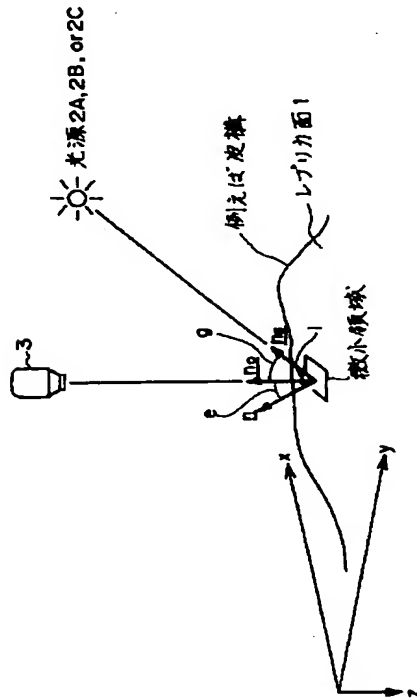
- 1 レプリカ面
2 A 第1光源
2 B 第2光源
2 C 第3光源

- 3 拡大光学系
4 撮像装置
5 A/D変換器
6 スイッチ
7 バス
8 CPU
9 メモリ
10 ROM
11 キーボード
12 プリンタ
13 CRTディスプレイ

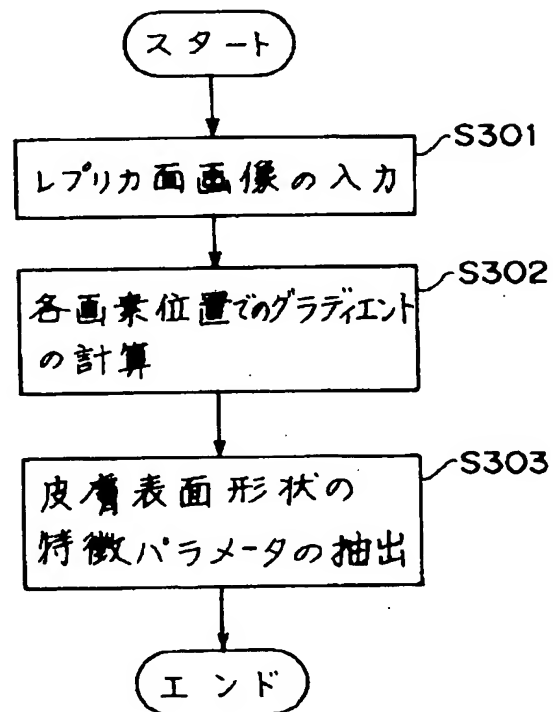
【図2】

【図3】

3次元形状復元の原理に関する説明図

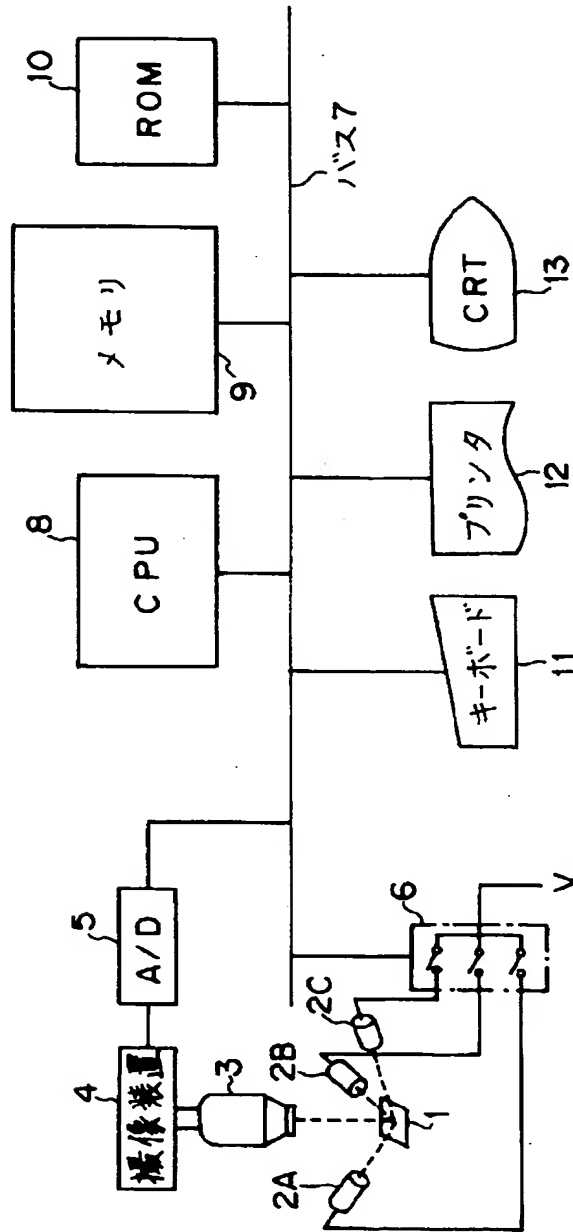


皮膚表面形状の特徴抽出装置の全体的な処理を示す動作フローチャート



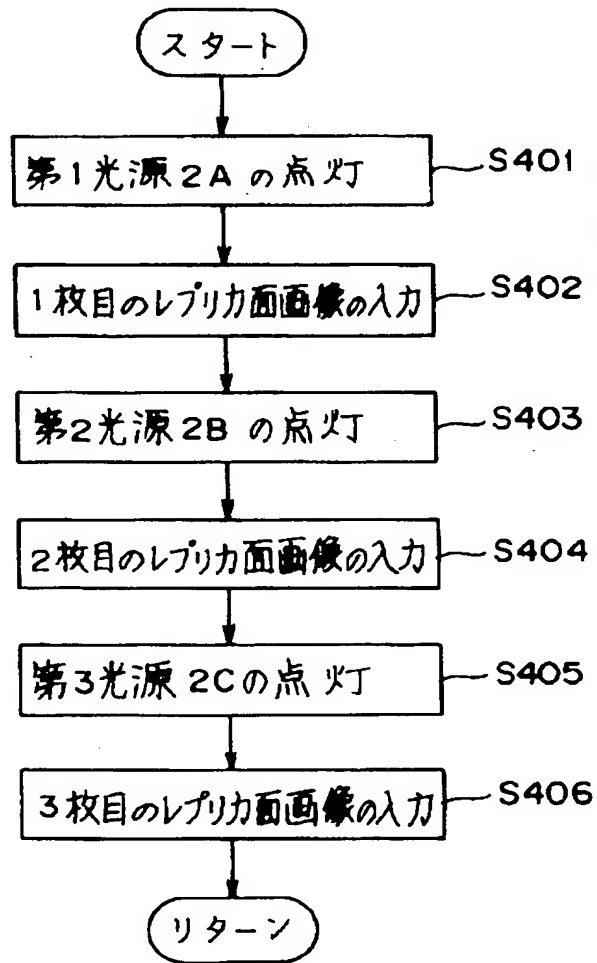
【図1】

本発明による皮膚表面形状の特徴抽出装置の構成図



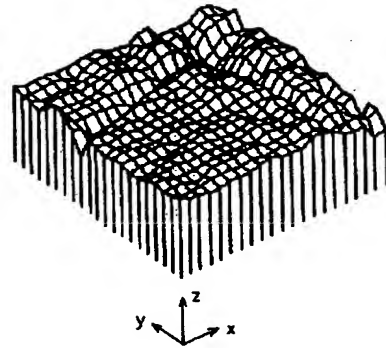
【図4】

レプリカ面画像の入力処理の動作フローチャート



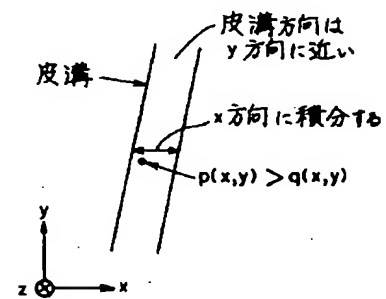
【図6】

レプリカ面1の3次元形状の鳥瞰図



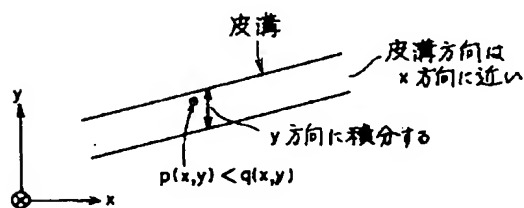
【図12】

積分方向の決定処理の説明図(その1)



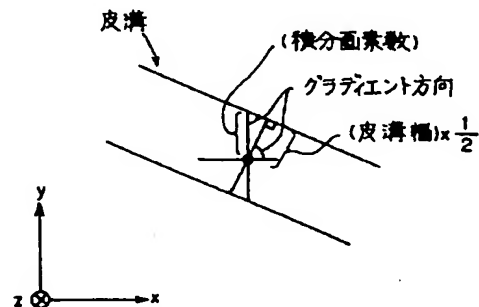
【図13】

積分方向の決定処理の説明図(その2)



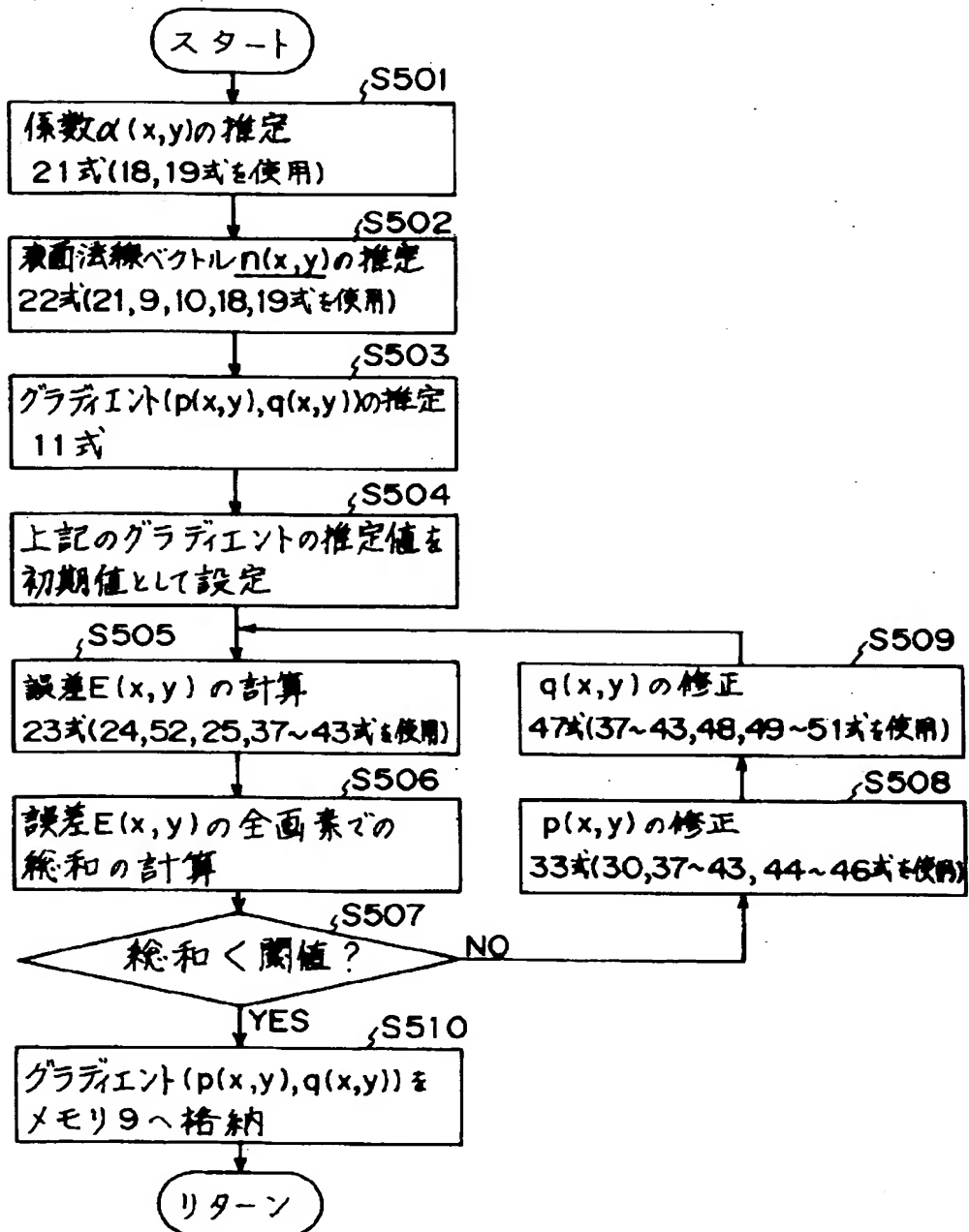
【図16】

皮溝底の画素での積分画素数と皮溝幅の関係の説明図(その2)



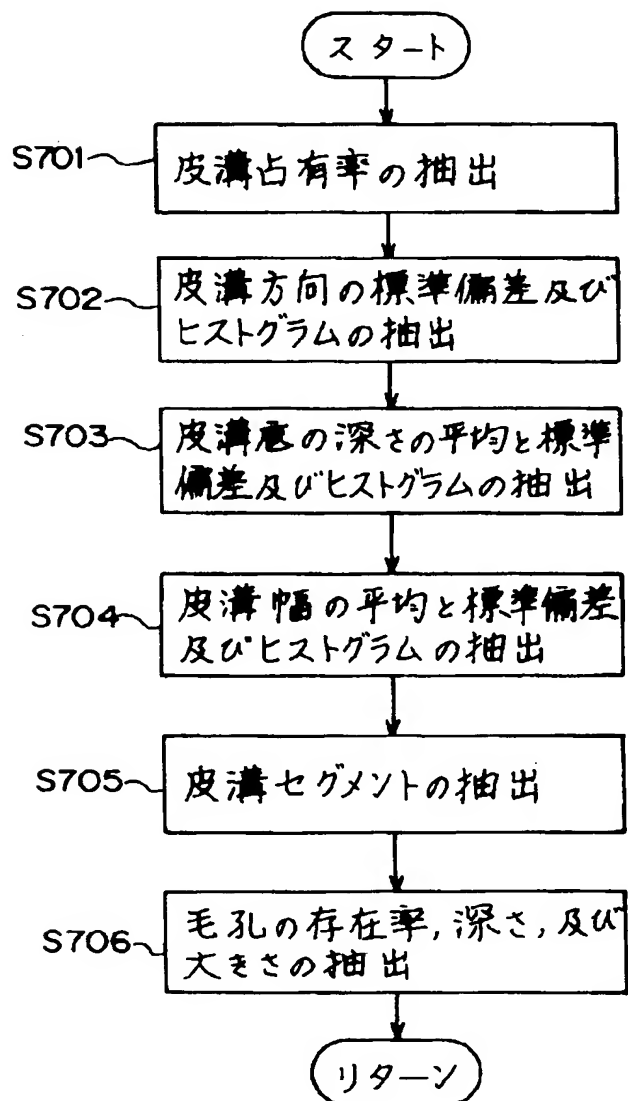
【図5】

各画素位置でのグラディエントの計算処理の動作フローチャート



【図7】

皮膚表面形状の特徴パラメータの抽出処理動作フローチャート

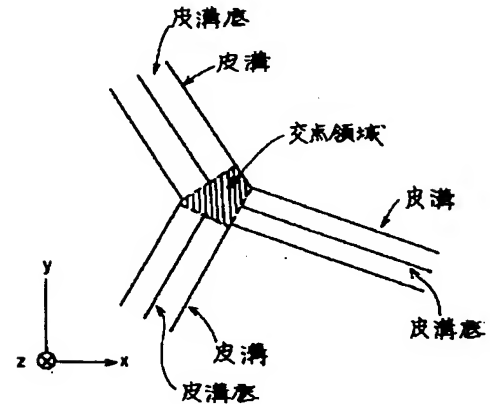
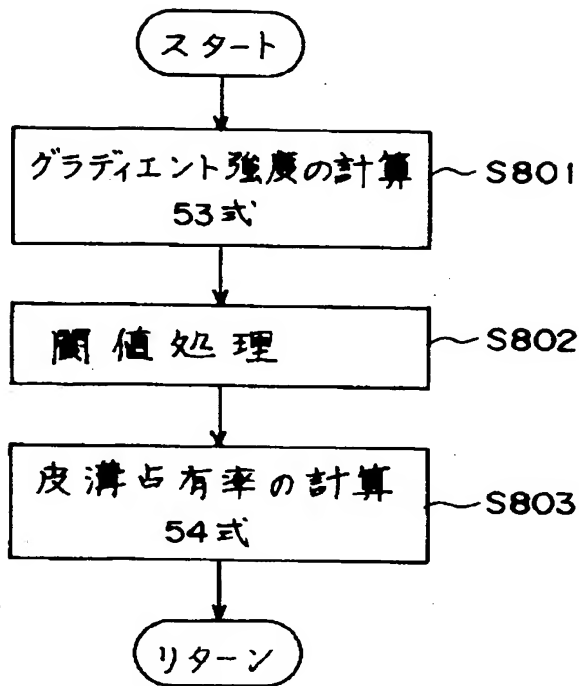


【図8】

【図21】

皮溝占有率の抽出処理の動作フローチャート

交点領域の抽出処理の説明図

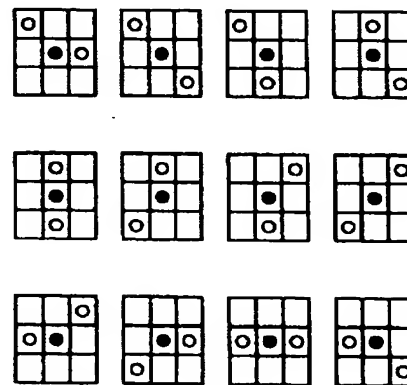
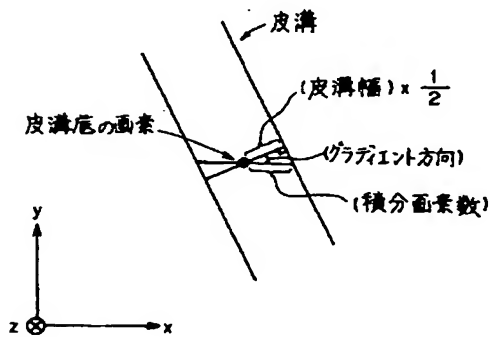


【図15】

【図18】

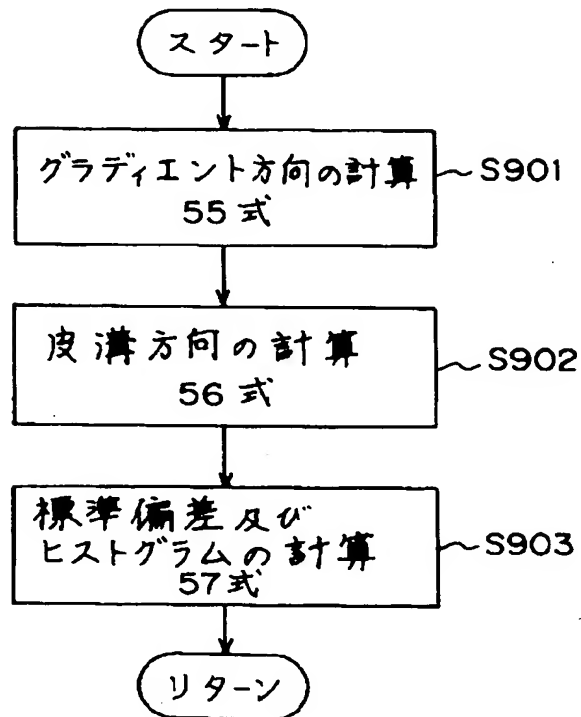
皮溝底の画素での積分画素数と皮溝幅の関係の説明図 (その1)

皮溝セグメントを抽出するためのオペレータを示した図 (その1)



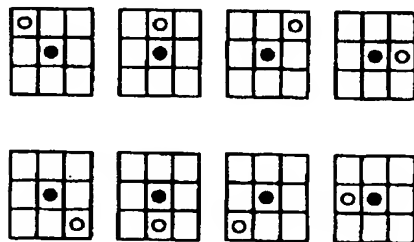
【図9】

皮溝方向の標準偏差及びヒストグラムの
抽出処理の動作フローチャート



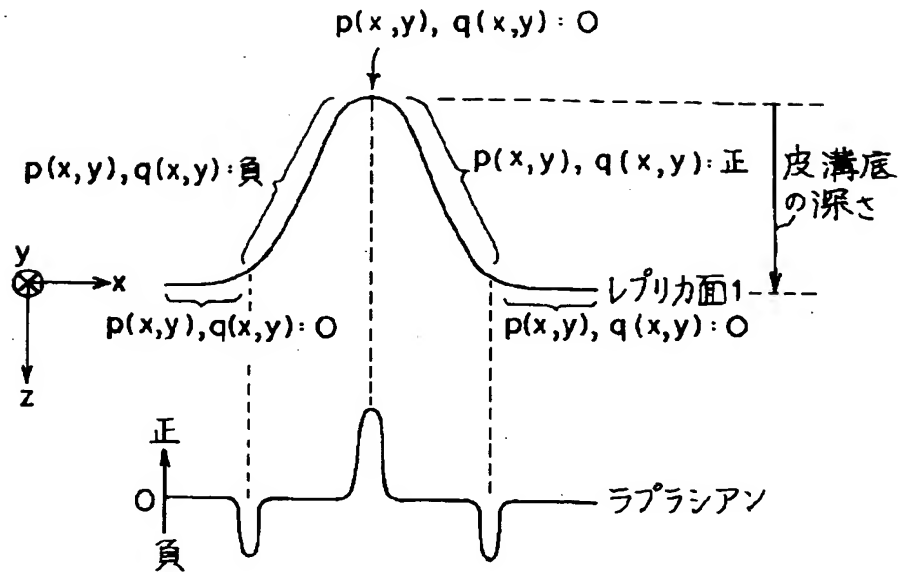
【図19】

皮溝セグメントを抽出するためのオペレータを示した図(その2)



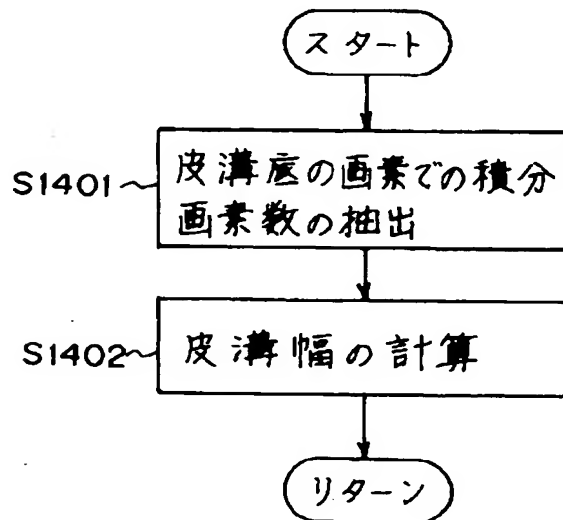
【図10】

皮溝の形状とラプラシアンとの関係の説明図



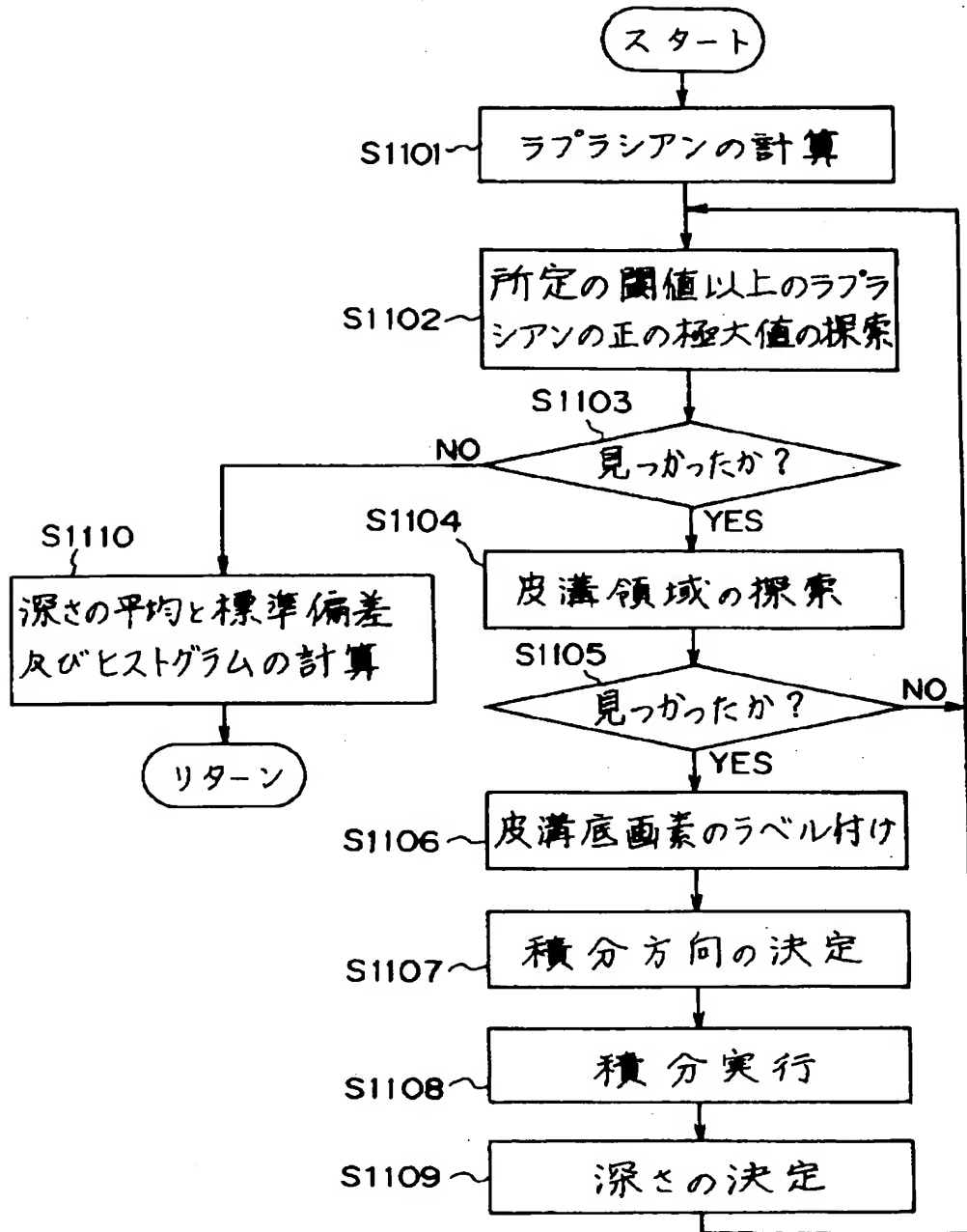
【図14】

皮溝幅の平均と標準偏差及びヒストグラムの抽出処理の動作フローチャート



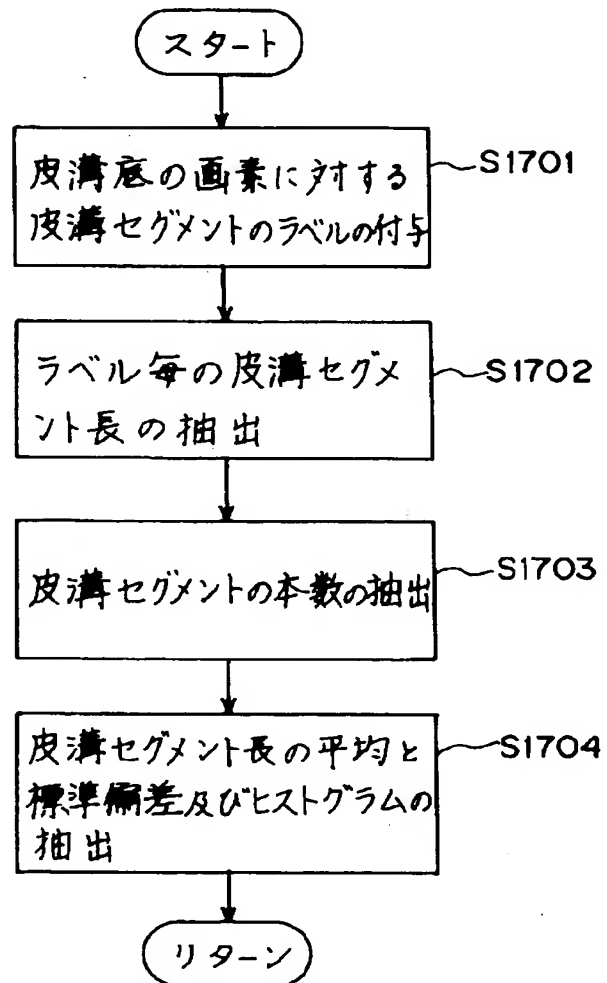
【図11】

皮溝底の深さの平均と標準偏差及びヒストグラムの抽出

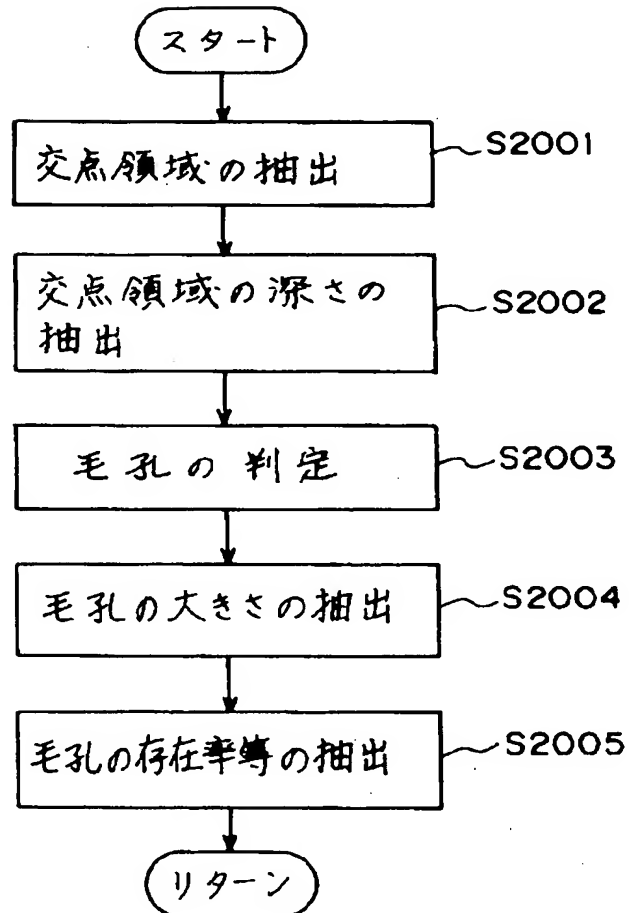


【図17】

皮溝セグメントの抽出処理の動作フローチャート



【図20】

毛孔の存在率, 深さ, 及び大きさの抽出処理の動作
フローチャート

フロントページの続き

(72)発明者 川尻 康晴
神奈川県横浜市港北区新羽町1050 資生堂
研究所内

(72)発明者 矢内 基裕
神奈川県横浜市港北区新羽町1050 資生堂
研究所内
(72)発明者 小沢 慎治
神奈川県鎌倉市岡本1-19-3-305

THIS PAGE BLANK (USPTO)